

Technische Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig

Integrierte Längs- und Querführung von Personenkraftwagen mittels Sliding-Mode- Regelung

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von

Thomas Eigel
aus Bielefeld

eingereicht am: 12. Juni 2009
mündlichen Prüfung am: 30. Oktober 2009
Referenten: Prof. Dr.-Ing. E. Schnieder
Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay

2010

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Forschungsabteilung „Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit“ der Volkswagen AG.

Mein besonderer Dank für die Betreuung der Arbeit gilt dem Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig, Herrn Professor Dr.-Ing. Eckehard Schnieder. Die fachlich fundierten Diskussionen und sein freudiges Interesse an den Inhalten der Arbeit trugen wesentlich zum Gelingen des Promotionsvorhabens bei. Herrn Professor Dr.-Ing. Ferit Küçükay und Herrn Professor Dr.-Ing. Karsten Lemmer danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferates sowie des Prüfungsvorsitzes.

Den Kollegen der Volkswagen Forschung danke ich für das angenehme und vielseitig inspirierende Arbeitsumfeld. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Sebastian Busch. Neben wertvollen Anregungen und der kritischen Durchsicht der Arbeit konnte ich während der langjährigen Zusammenarbeit viel von Ihm lernen. Weiterhin möchte ich den Herren Frank Schroven, Dr.-Ing. Tobias Giebel und Dr.-Ing. Simon Karrenberg für die ausgiebigen Diskussionen meinen Dank aussprechen. Herrn Klaus-Dieter Kowalewicz und der gesamten Werkstattmannschaft danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit und die hervorragende Umsetzung vieler Ideen. Schließlich möchte ich meinem Abteilungsleiter Herrn Thomas Ruchatz sowie seinem Amtsvorgänger Herrn Carsten Spichalsky und meinem Unterabteilungsleiter Herrn Dr.-Ing. Stefan Brosig sowie seinem Vorgänger Herrn Dr.-Ing. Christoph Keßler für das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheit bei der Bearbeitung der Aufgabe danken.

Bei allen Korrekturlesern möchte ich mich für die Kritiken und Anregungen auch hinsichtlich nicht technischer Aspekte bedanken. Neben bereits genannten Personen ist dies insbesondere Frau Josefine Frank.

Für die Ermöglichung dieser Arbeit – über die Schaffung biologischer Tatsachen hinausgehend – möchte ich meinen Eltern auf das Ursprünglichste danken. Ebenso bin ich meinem Bruder Dr.-Ing. Martin Eigel zu Dank verpflichtet, dessen Einfluss mich mittelbar in das interessante Themenfeld der vorliegenden Arbeit geführt hat. Schließlich möchte ich mich bei Frau Elisabeth Frank für die Ausdauer und den Rückhalt während der Verfassung der Arbeit bedanken.

Berlin, im März 2009

Thomas Eigel

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist der Entwurf eines Fahrerassistenzsystems zur automatisierten Längs- und Querverführung eines Straßenfahrzeugs. Das Assistenzsystem soll den Fahrer bei der Fahrzeugführung auf Autobahnen sowie gut ausgebauten Landstraßen unterstützen und entlasten. Dem System können dabei unterschiedliche Architekturen zugrunde liegen. So können zwei *parallel* betriebene Regelungen die Fahrzeugführung in Längs- und Querrichtung unabhängig voneinander vornehmen. Bei einer *kombinierten* Längs- und Querverführung werden Wechselwirkungen zwischen den vorher separaten Regelungssystemen explizit eingeführt. Für eine *integrierte* Längs- und Querverführung besteht eine implizite Kopplung zwischen den beiden Bewegungsrichtungen.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf dem Entwurf von Regelungssystemen. Dabei werden zunächst zwei parallel betriebene Regelungen untersucht, die jeweils eine Soll-Beschleunigung in Längs- bzw. Querrichtung erzeugen. Anschließend wird eine integrierte Regelung zur Längs- und Querverführung entworfen, die Soll-Beschleunigungen für beide Bewegungsrichtungen generiert. Als Regelungsprinzip beider Ansätze kommen sogenannte *Sliding-Mode*-Regler zum Einsatz. Dabei handelt es sich um strukturvariable Regler, deren Entwurf in einem Phasenraum des zu regelnden Systems erfolgt. Für die parallel betriebenen Regler ergeben sich zwei zweidimensionale Phasenräume, für den integrierten Ansatz ein vierdimensionaler Phasenraum. Durch Modifikationen werden die *Sliding-Mode*-Regler an die Aufgaben der Abstandsregelung, der Fahrstreifenmittenführung sowie der Durchführung eines Überholmanövers bei gleichzeitiger Längsbeschleunigung angepasst. Die Funktionsweise der Regelungen wird anhand zuvor hergeleiteter Modelle der Fahrzeugbewegung untersucht. Die Modellparameter wurden dabei experimentell ermittelt und in Fahrversuchen validiert.

Abschließend werden Ergebnisse realer Fahrversuche präsentiert. Hierzu wird ein Fahrerassistenzsystem implementiert, das neben den zuvor entworfenen Regelungen eine geeignete Sensorik zur Erfassung des Fahrzeugumfelds, eine Aktorik zur Beeinflussung der Fahrzeugbewegung sowie ein Bedienkonzept zur Interaktion des Fahrers mit dem Assistenzsystem umfasst. Die untersuchten Szenarien beinhalten alltägliche und kritische Fahrsituationen, teilweise mit Störeingriffen durch den Fahrer. Es wird gezeigt, dass das entworfene Fahrerassistenzsystem für die Fahrzeugführung in den beschriebenen Verkehrssituationen geeignet ist und sich eine Parametrierung der Regler anschaulich gestaltet.

Abstract

The subject of this work is the development of a driver assistance system for the automatic longitudinal and lateral guidance of an automobile. The assistance system should support and relieve the driver in vehicle guidance on motorways as well as improved highways. The system could be based on different architectures. Thus, two control systems operating in *parallel* could intervene in the vehicle's longitudinal and lateral guidance independent of each other. In the case of *combined* longitudinal and lateral control, the interaction between the previously separate control systems is explicitly introduced. An implicit coupling between the two directions of motion exists for the *integrated* longitudinal and lateral control.

This work focuses on the design of control systems. First, two control systems operating in parallel are examined, each of which generates a desired longitudinal and lateral vehicle acceleration respectively. Then an integrated controller for longitudinal and lateral guidance is designed, which generates desired accelerations in both directions of movement. *Sliding mode control* is applied as the control principle in both approaches. It is a variable structure control system, the design of which takes place in a phase space of the system to be controlled. The two two-dimensional phase spaces for the controls operated in parallel result in a four-dimensional phase space for integrated use. The sliding mode control is modified for tasks of distance control, lane guidance and passing manoeuvres with simultaneous longitudinal acceleration. The manner in which the controls function is examined using previously derived models of vehicle motion. The model parameters were determined experimentally and validated in driving tests.

Finally, the results of actual driving tests are presented. For this purpose, a driver assistance system is implemented which includes, in addition to the previously designed controllers, appropriate sensors for detecting the vehicle's environment, actuators for influencing vehicle motion as well as an interface between the driver and the assistance system. The scenarios which were examined include daily and critical driving situations, some with disruptive driver intervention. It is shown that the developed driver assistance system for vehicle guidance is appropriate for the described traffic situations and the parameterization of the control proves to be comprehensible.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Fahrerassistenzsysteme | 2 |
| 1.2 | Motivation und Zielsetzung | 8 |
| 1.3 | Vorgehensweise | 9 |
| 2 | Stand der Forschung | 11 |
| 2.1 | Forschungsprogramme | 11 |
| 2.2 | Längsführung | 20 |
| 2.2.1 | Aktorik und Sensorik für die Längsführung | 20 |
| 2.2.2 | Ansätze zur Regelung der Längsdynamik | 21 |
| 2.3 | Querführung | 25 |
| 2.3.1 | Aktorik und Sensorik für die Querführung | 26 |
| 2.3.2 | Ansätze zur Regelung der Querdynamik | 27 |
| 2.4 | Längs- und Querführung | 31 |
| 3 | Modellierung | 35 |
| 3.1 | Ansatz zur Systemmodellierung | 36 |
| 3.2 | Modellierung der Längsbewegung | 38 |
| 3.2.1 | Dynamik der Längsbeschleunigung | 39 |
| 3.2.2 | Begrenzungen des Beschleunigungsvermögens | 40 |
| 3.2.3 | Längsmodell und Validation | 42 |
| 3.3 | Modellierung der Querbewegung | 43 |
| 3.3.1 | Dynamik des Lenkaktors | 44 |
| 3.3.2 | Einspurmodell der Querdynamik | 45 |
| 3.3.3 | Quermodell und Validation | 47 |
| 3.4 | Modellierung der Längs- und Querbewegung | 49 |
| 4 | Regelung | 51 |
| 4.1 | Ansatz zur automatisierten Fahrzeugführung | 52 |
| 4.1.1 | Geschwindigkeitsregelung | 54 |
| 4.1.2 | Prinzip der Sliding-Mode-Regelung | 56 |
| 4.2 | Längsregelung | 66 |
| 4.2.1 | Überlegungen zur Abstandsregelung | 66 |
| 4.2.2 | Auslegung des Gleitzustands (längs) | 68 |
| 4.2.3 | Regelgesetz (längs) | 73 |
| 4.2.4 | Parametrierung (längs) | 80 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3 | Querregelung | 83 |
| 4.3.1 | Überlegungen zur Querregelung | 83 |
| 4.3.2 | Auslegung des Gleitzustands (quer) | 84 |
| 4.3.3 | Regelgesetz (quer) | 87 |
| 4.3.4 | Parametrierung (quer) | 92 |
| 4.4 | Integrierte Längs- und Querregelung | 94 |
| 4.4.1 | Überlegungen zur integrierten Längs- und Querführung | 95 |
| 4.4.2 | Definition des Soll-Verhaltens (integriert) | 97 |
| 4.4.3 | Regelgesetz (integriert) | 104 |
| 4.4.4 | Parametrierung (integriert) | 105 |
| 4.5 | Unterlagerte Beschleunigungsregelungen | 108 |
| 5 | Implementierung und Fahrversuche | 111 |
| 5.1 | Systemarchitektur | 112 |
| 5.2 | Fahrversuche zur Längsführung | 116 |
| 5.3 | Fahrversuche zur Querführung | 118 |
| 5.4 | Fahrversuche zur integrierten Längs- und Querführung | 122 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 127 |
| | Literaturverzeichnis | 131 |

Symbolverzeichnis

Im Folgenden sind die wichtigsten Formelzeichen und Abkürzungen der Arbeit aufgeführt. Vektoren und Matrizen werden durch fettgedruckte Klein- bzw. Großbuchstaben gekennzeichnet.

Indizes

| | |
|-----------------------------|--|
| $\{\cdot\}^+$ | Größe für positive Beschleunigung |
| $\{\cdot\}^-$ | Größe für negative Beschleunigung |
| $\{\cdot\} \Leftrightarrow$ | kontinuierlicher Regelanteil einer äquivalenten <i>Sliding-Mode</i> -Regelung |
| $\{\cdot\}_{\Delta\dot{x}}$ | Projektion in den Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta\dot{x}}$ |
| $\{\cdot\}_{\Delta\dot{y}}$ | Projektion in den Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta\dot{y}}$ |
| $\{\cdot\}_{\Omega}$ | Endwert der Größe |
| $\{\cdot\}_0$ | Anfangswert der Größe |
| $\{\cdot\}_{\text{const}}$ | konstante Größe |
| $\{\cdot\}_d$ | diskontinuierlicher Regelanteil einer äquivalenten <i>Sliding-Mode</i> -Regelung |
| $\{\cdot\}_{\text{längs}}$ | Größe bezieht sich auf die Teilaufgabe der Längsführung |
| $\{\cdot\}_{\text{max}}$ | Maximalwert einer Größe |
| $\{\cdot\}_{\text{quer}}$ | Größe bezieht sich auf die Teilaufgabe der Querführung |
| $\{\cdot\}_{\text{ref}}$ | Zustand auf Soll-Trajektorie |
| $\{\cdot\}_{\text{soll}}$ | Soll-Wert der Größe |
| $\{\cdot\}_{\text{Ego}}$ | Größe des geregelten Fahrzeugs |
| $\{\cdot\}_{\text{Obj}}$ | Größe eines Vorderfahrzeugs |

Fahrzeug- und Sensorgrößen

| | |
|------------------------|--|
| κ | Fahrstreifenkrümmung |
| Δx | Abstand zu einem Vorderfahrzeug |
| $\Delta \dot{x}$ | Relativgeschwindigkeit bzgl. eines Vorderfahrzeugs |
| $\Delta \ddot{x}$ | Relativbeschleunigung bzgl. eines Vorderfahrzeugs |
| Δy | Querablage von der Fahrstreifenmitte |
| $\Delta \dot{y}$ | Quergeschwindigkeit bzgl. des Fahrstreifens |
| $\Delta \ddot{y}$ | Relativbeschleunigung bzgl. des Fahrstreifens |
| Δy_{FS} | Fahrstreifenbreite |
| t_L | Zeitlücke |

Fahrzeugmodellierung

| | |
|---------------------------------------|---|
| $\alpha_{\{h v\}}$ | Schräglaufwinkel der Hinter- bzw. Vorderräder |
| β | Schwimmwinkel |
| δ | Vorderradeinschlagwinkel |
| ψ | Giergeschwindigkeit |
| $c_{\{h v\}}$ | hintere bzw. vordere Reifenseitensteifigkeit |
| $e(t)$ | Fehler zwischen dem Ausgangssignal eines Modells und der zu modellierenden Strecke |
| $l_{\{h v\}}$ | Abstand zwischen Fahrzeugschwerpunkt und Hinter- bzw. Vorderachse |
| m_{Fzg} | Fahrzeugmasse |
| n_k | konstruktiver Nachlauf |
| n_R | Reifennachlauf |
| n_v | Gesamtnachlauf |
| $u(t)$ | Eingangssignal |
| $\mathbf{v}_{\{h v\}}$ | Geschwindigkeitsvektoren Schwerpunkt, Hinterrad und Vorderrad |
| $y(t)$ | Ausgangssignal des realen Systems |
| $\hat{y}(t)$ | Ausgangssignal des Systemmodells |
| F_{KW} | Kurvenwiderstand |
| F_{LW} | Luftwiderstandskraft |
| $F_{x\{h v\}}$ | hintere bzw. vordere Antriebskraft |
| $F_{y\{h v\}}$ | hintere bzw. vordere Seitenkraft |
| $G_{\text{längs}}^{\{+ - \}}(s)$ | Übertragungsfunktion des Modells der Fahrzeuglängsbewegung für positive bzw. negative Beschleunigungen |
| $G_{\text{Lenkung}}(s)$ | Übertragungsfunktion des Modells der Lenkaktorik |
| J_{LA} | Trägheitsmoment der Lenkanlage |
| $J_{z,\text{Fzg}}$ | Trägheitsmoment um die Fahrzeughochachse |
| $K_{\text{längs}}^{\{+ - \}}$ | proportionale Verstärkung der Übertragungsfunktion des Längsmodells für positive bzw. negative Beschleunigungen |
| K_{Lenkung} | proportionale Verstärkung der Übertragungsfunktion des Lenkaktormodells |
| $T_{\{1 2\},\text{längs}}^{\{+ - \}}$ | Zeitkonstanten eines PT_2 -Gliedes zur Modellierung der Fahrzeuglängsbeschleunigung |
| T_{Lenkung} | Zeitkonstante eines PT_1 -Gliedes zur Modellierung der Lenkaktordynamik |

Regelung

| | |
|------------------------------|---|
| \mathcal{R} | Zustandsraum bzw. Teilraum |
| χ | Zustandsvektor mit Größen der Längs- und Querbewegung |
| $\delta_{\{s \text{traj}\}}$ | Steigung der Schaltkurve bzw. der Systemtrajektorie |
| $\Delta x_V^{\{+ - \}}$ | Verschiebung der Parabeln zur Konstruktion der Schaltkurve zur Abstandsregelung |
| Δy^* | Parameter zur Auslegung der Schaltkurve der Querregelung |

| | |
|--------------------------------------|--|
| ω | Winkelgeschwindigkeit der sinusförmigen Querbeschleunigungsvorgabe |
| Φ | Grenzschichtbreite |
| ξ | Zustandsvektor des Beispielsystems zur Erläuterung des <i>Sliding-Mode</i> -Prinzips |
| $a_{\text{längs}}^{\{+ - \}}$ | Parameter der Parabelanteile der Schaltkurve zur Abstandsregelung |
| a_{quer} | Stauchung der Parabelanteile der Schaltkurve zur Querregelung |
| b_{quer} | Verschiebung der Parabelanteile der Schaltkurve zur Querregelung |
| $e_{\dot{x}}$ | Abweichung von der Fahrerwunschgeschwindigkeit |
| $e_{\dot{x},\text{max}}^+$ | Parameter Geschwindigkeitsregler (pos. Beschleunigung) |
| $e_{\dot{x},\text{p1}}^-$ | Parameter Geschwindigkeitsregler (neg. Beschleunigung) |
| $e_{\dot{x},\text{p2}}^-$ | Parameter Geschwindigkeitsregler (neg. Beschleunigung) |
| m | Steigung des Geradenanteils einer Schaltkurve |
| \mathbf{s} | Schaltfunktionen einer <i>Sliding-Mode</i> -Regelung |
| $u(t)$ | Eingangssignal |
| \dot{x}_{ist} | momentane Längsgeschwindigkeit |
| $\ddot{x}_{\text{max,G}}^+$ | Parameter Geschwindigkeitsregler (pos. Beschleunigung) |
| $\ddot{x}_{\text{max,G}}^-$ | Parameter Geschwindigkeitsregler (neg. Beschleunigung) |
| $\ddot{x}_{\text{passiv,G}}^-$ | Parameter Geschwindigkeitsregler (neg. Beschleunigung) |
| \dot{x}_{soll} | Fahrerwunschgeschwindigkeit |
| $\ddot{x}_{\text{soll,G}}$ | Soll-Längsbeschleunigung des Geschwindigkeitreglers |
| \ddot{y}_{κ} | Zentripetalbeschleunigung bei Kurvenfahrt |
| \mathbf{A} | Systemmatrix einer Regelstrecke |
| \mathbf{B} | Eingangsmatrix einer Regelstrecke |
| K_{sin} | Parameter Geschwindigkeitsregler (pos. Beschleunigung) |
| \mathbf{S} | Schaltmannigfaltigkeit einer <i>Sliding-Mode</i> -Regelung |
| $T^{\{+ - \}}$ | Übergangspunkt zwischen Geradenanteil und Parabelanteil einer Schaltkurve |
| V | Ljapunov-Kandidatenfunktion zur Untersuchung der Attraktivität einer <i>Sliding-Mode</i> -Regelung |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------------|--|
| ABS | Anti-Blockiersystem |
| ACC | Adaptive Cruise Control |
| ACC-FSR | ACC Full Speed Range |
| ACC-FTS | ACC Follow to Stop |
| ACC ^{iB} | ACC im Ballungsraum |
| ADAS | Advanced Driver Assistance System |
| AHS | Advanced Cruise-Assist Highway Systems |
| AHSRA | Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association |
| AKTIV | adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr |
| AKTIV-AS | AKTIV-Projekt Aktive Sicherheit |
| AKTIV-CoCar .. | AKTIV-Projekt Cooperative Cars |
| AKTIV-VM | AKTIV-Projekt Verkehrsmanagement |
| ASR | Antriebsschlupfregelung |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| CACC | Cooperative Adaptive Cruise Control |
| CAN | Controller Area Network |
| CCD | Charge-coupled Device |
| DARPA | Defence Advanced Research Projects Agency |
| DGPS | Differential GPS |
| EPS | Electric Power Steering |
| ESP | elektronisches Stabilitätsprogramm |
| ETC | Electronic Toll Collection |
| FAS | Fahrerassistenzsystem |
| GPC | Generalized Predictive Control |
| INVENT | intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik |
| INVENT-FAS ... | INVENT-Projekt Fahrerassistenz, aktive Sicherheit |
| INVENT-STA ... | INVENT-Projekt Stauassistent |
| INVENT-VM2010 | INVENT-Projekt Verkehrsmanagement 2010 |
| INVENT-VMTL .. | INVENT-Projekt Verkehrsmanagement in Transport und Logistik |
| FTF | führerloses Transportfahrzeug |
| GPS | Global Positioning System |
| GRA | Geschwindigkeitsregelanlage |
| IVHS | Intelligent Vehicle Highway Systems |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|------------------|--|
| HC | H eading C ontrol |
| HMI | H uman- M achine- I nterface |
| LCA | L ane C hange A ssistant |
| LDW | L ane D eparture W arning |
| LIDAR | L ight D etection and R anging |
| LQG | L inear Q uadratic G aussian |
| LQR | L inear Q uadratic R egulator |
| LKS | L ane K eeping S upport |
| MLIT | M inistry of L and, I nfrastructure and T ransport |
| MOTIV | M obilität und T ransport im intermodalen V erkehr |
| MPR | m odellprädiktive R egelung |
| PATH | P artners for A dvanced T ransit and H ighways |
| PROMETHEUS | P rogramme for E uropean T raffic with H ighest and U nprecedented S afety |
| RADAR | R adiation D etection and R anging |
| RFID | R adio F requency I dentification |
| SVC | S tructure V ariable C ontrol |
| SWA | S purwechselassistent |
| TMC | T raffic M essage C hannel |
| TSA | T railer S tability A ssist |
| UML | U nified M odeling L anguage |
| VICS | V ehicle I nformation and C ommunication S ystem |

Kapitel 1

Einleitung

Ich glaube an das Pferd. Das
Auto ist eine vorübergehende
Modeerscheinung.

(Wilhelm II., 1859-1941)

Die gesellschaftliche Entwicklung der letzten Jahrzehnte führte zu einer erhöhten Forderung nach Mobilität und damit zu einem beständigen Wachstum des Verkehrsaufkommens (Schnieder 2007; Dinse u. a. 2001). Der Grund hierfür ist einerseits die räumliche Trennung von Wohnort und Arbeitsplatz sowie die Durchführung von Freizeitaktivitäten. Andererseits führt der expandierende internationale Handel zu einer Steigerung des Güterverkehrs. Sowohl im Personen- als auch im Gütertransport dominiert der motorisierte Straßenverkehr. Durch den Wunsch nach individueller Mobilität, die moderaten Nutzungskosten von PKW und den Ausbau der Infrastruktur wurde der Straßenverkehr zum wichtigsten Verkehrsträger, der voraussichtlich weiter an Bedeutung gewinnen wird (Koch u. a. 2005).

Dem Nutzen des Verkehrs stehen negative Folgeerscheinungen gegenüber: Verkehrsunfälle, Emissions- und Lärmbelästigung sowie ökonomische Schäden infolge von Staus, insbesondere in Ballungsgebieten. Ein Ziel der Verkehrsindustrie und Politik besteht darin, die Mobilität dauerhaft zu gewährleisten und gleichzeitig diese negativen Auswirkungen des Verkehrs zu verringern.

Neben der Verlagerung, Vermeidung und Rationalisierung des Verkehrs kann die Weiterentwicklung des Verkehrsträgers zur Erfüllung dieses Ziels beitragen. Im Falle des Straßenverkehrs fanden aus diesem Grund verstärkt Fahrerassistenzsysteme (FAS, *Advanced driver assistance systems*, ADAS) Einzug in den Fahrzeugsektor. Die vorliegende Arbeit beschreibt den Entwurf eines Assistenzsystems, das den Fahrer bei der Fahrzeugführung unterstützt. Die Unterstützung erfolgt dabei sowohl bei der Beschleunigung und Verzögerung des Fahrzeugs als auch beim Lenken. Neben einer Entlastung des Fahrers und der damit verbundenen verringerten Ermüdung bei langen Fahrten lässt sich eine Homogenisierung des Verkehrs durch den Einsatz eines solchen Assistenzsystems erwarten.

Um eine Einordnung des entworfenen Systems zu erleichtern, findet in Abschnitt 1.1 zunächst eine Definition der Fahrerassistenz statt. Außerdem werden die Teilaufgaben bei

der Fahrzeugführung analysiert und daraus abgeleitete Einsatzgebiete für Assistenzsysteme dargestellt.

Ausgehend von heutigen, in Serienfahrzeugen verfügbaren Fahrerassistenzsystemen wird in Abschnitt 1.2 die Entwicklung der in dieser Arbeit behandelten Assistenzsysteme motiviert und eine Zielsetzung abgeleitet. Weiterhin werden die Rahmenbedingungen bei der Bearbeitung dieser Ziele beschrieben.

Abschließend wird in Abschnitt 1.3 die Vorgehensweise zur Umsetzung der zuvor beschriebenen Ziele erläutert und die inhaltliche Struktur der Arbeit veranschaulicht.

1.1 Fahrerassistenzsysteme

Im Folgenden wird der Begriff der Fahrerassistenz definiert und eine Abgrenzung gegenüber autonom agierenden Fahrzeugsystemen vorgenommen. Im Anschluss findet eine Untersuchung der vom Fahrer zu leistenden Fahraufgabe statt. Daraus resultieren Einsatzgebiete für assistierende Systeme. Anhand von Beispielen wird ein Überblick über bereits verfügbare Fahrerassistenzsysteme gegeben.

Fahrerassistenzsysteme vs. autonome Fahrzeugsysteme

Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer bei der Aufgabe der Fahrzeugführung und sollen im Wesentlichen den Komfort oder die Sicherheit erhöhen. Die Begriffsdefinition der Assistenz

as|sis|tie|ren <sw. V.; hat> [lat. assistere = dabeistehen; unterstützen]: jmdm. nach dessen Anweisungen zur Hand gehen, bei einer Arbeit oder Tätigkeit behilflich sein ... (Duden 2003)

impliziert, dass der Fahrer Herr der Situation sein muss. Er trägt juristisch weiterhin die volle Verantwortung für die Fahrzeugbewegung und muss demnach das Assistenzsystem jederzeit übersteuern können (Haller 2001). Weiterhin kann ein Fahrerassistenzsystem die Kompetenzen des Fahrers nicht erweitern, sondern erleichtert per Definition nur die Ausführung von Arbeiten, die ohnehin anstehen. Ein Antiblockiersystem (ABS) beispielsweise kann den Anhalteweg nicht verkürzen, sondern nur den Fahrer bei der Umsetzung einer gewünschten Verzögerung unterstützen und das Fahrzeug in einem lenkbaren Zustand halten.

Im Gegensatz zu assistierenden Systemen, bei denen der Fahrer die Verantwortung für die Fahrzeugführung trägt, bewegen sich sogenannte autonome Systeme ohne menschliches Zutun in ihrer Umwelt:

au|to|nom <Adj.> [griech. autónomos] (bildungsspr.): [verwaltungsmäßig] selbstständig, unabhängig ... (Duden 2003).

Bereits im Einsatz sind autonome Systeme z. B. als fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) in Häfen und Industrieanlagen. Weitere Beispiele sind unbemannte Flugzeuge, Unterwasserfahrzeuge, aber auch Landwirtschafts- und Baufahrzeuge. Autonome Straßenfahrzeuge werden z. B. von Söhnitz (2001), Götting (2001) und Mayr (2001) untersucht. Bevor solche Fahrzeugsysteme im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzt werden können, müssen im Wesentlichen technische und juristische Probleme überwunden werden.

Fahrerassistenzsysteme im Kontext

Um abschätzen zu können, wobei und auf welche Weise eine Unterstützung des Fahrers sinnvoll ist, wird im Folgenden die Struktur der Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Interaktion untersucht. Dazu ist es zweckmäßig, die Aufgabe der Fahrzeugführung in im Wesentlichen unabhängige Teilaufgaben zu gliedern. Nach Donges (1982) ergeben sich die drei Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung.¹

Navigation Der Fahrer bestimmt anhand der Transportaufgabe und unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien (möglichst schnell/kurz/sicher/einfach, etc.) eine Route im bestehenden Straßennetz. Dabei können sowohl Karteninformationen als auch Kenntnisse über Behinderungen beispielsweise durch Staus, Baustellen oder Geschwindigkeitsbeschränkungen in die Planung einfließen. Meist wird die Route vor Fahrtantritt festgelegt. Ihre Umsetzung erfordert während der Fahrzeugführung die Wahrnehmung und Interpretation von Verkehrs- und Hinweisschildern sowie sonstiger Orientierungshilfen.

Bahnführung Die Bahnführung ist der Navigation unterlagert und beinhaltet die Anpassung der Fahrweise an den Straßenverlauf und den umgebenden Verkehr. Durch Eingriffe in die Längs- und Querdynamik kann der Fahrer Manöver wie z. B. das Führen des Fahrzeugs entlang des Fahrstreifens, Fahrstreifenwechsel oder Abbiegemanöver realisieren.

Stabilisierung Auf Stabilisierungsebene besteht die Aufgabe des Fahrers darin, einen fahrdynamisch stabilen Zustand des Fahrzeugs zu gewährleisten und die Zielgrößen aus den längs- und querdynamischen Vorgaben in eine Fahrzeugbewegung umzusetzen. Dem Fahrer stehen dazu die Lenkung, das Gas- und Bremspedal sowie die Beeinflussung des Getriebes zur Verfügung.

Die oben genannten Teilaufgaben unterscheiden sich hinsichtlich der Priorität, Dauer und Häufigkeit der Abarbeitung sowie der Anforderung an den Fahrer.

¹ Alternativ z. B. von Jürgensohn und Timpe (2000) auch Planen, Manövrieren und Stabilisieren genannt.

- *Priorität*: Übergeordnete Ebenen sollten nur behandelt werden, wenn untergeordnete Teilaufgaben ausreichend bewältigt werden. Die Stabilisierung besitzt demnach die höchste Priorität. Nur wenn diese Teilaufgabe erfüllt ist, kann sich der Fahrer mit der Bahnführung und letztlich mit der Navigation befassen.
- *Dauer und Häufigkeit der Abarbeitung*: Die Stabilisierungsaufgabe wird mit höchster Frequenz und der kürzesten Dauer bearbeitet. Die Häufigkeit der Bearbeitung nimmt über die Bahnführung zur Navigation ab, während die Bearbeitungsdauer ansteigt.
- *Anforderung an den Fahrer*: Die Komplexität und damit die Beanspruchung des Fahrers hängt von der Anzahl der zur Lösung der Aufgabe verfügbaren Freiheitsgrade ab. Im Verlauf der Stabilisierung werden meist nur einfache, reaktive Eingriffe durch den Fahrer geleistet. Er kann beispielsweise auf plötzlichen Seitenwind nur mit einem Lenkeingriff reagieren. Bei der Bearbeitung der Bahnführungsaufgabe stehen dem Fahrer bereits eine Vielzahl alternativer Handlungen zur Verfügung. Er muss sich z. B. entscheiden, hinter einem langsameren Fahrzeug zu verzögern oder ein Überholmanöver einzuleiten. Dies erfordert Fertigkeiten wie Antizipationsvermögen oder Kenntnis der gültigen Verkehrsregeln. Eine noch stärkere Beanspruchung des Fahrers findet auf der Navigationsebene statt. Unter anderem muss er Verkehrszeichen interpretieren und Karteninformationen in eine Richtungswahl umsetzen. Auch die Planung der Route besitzt im Allgemeinen eine Vielzahl an Freiheitsgraden.

Der Kontext, in dem sich Fahrer, Fahrzeug und Umwelt befinden, ist in Abbildung 1.1 veranschaulicht. Durch Lenkeingriffe bzw. Pedalbetätigung ändert sich der Fahrzeugzustand und es ergibt sich eine Relativbewegung bezüglich der Umwelt. Der Fahrer erfasst diese Relativbewegung direkt oder mit Hilfe von Messeinrichtungen wie z. B. einem Geschwindigkeitsmesser. Fahrereingriffe erfolgen unter Berücksichtigung der Fahrzeugbewegung und des Verkehrsumfelds. Diese Wirkungskette wird in Abbildung 1.1 um ein parallel zum Fahrer angeordnetes Fahrerassistenzsystem erweitert. Abhängig von der Aufgabe, bei der das Assistenzsystem unterstützen soll, werden Sensoren und gegebenenfalls Aktoren benötigt. Die Sensoren erfassen Informationen über den Fahrzeugzustand bzw. die Umwelt, mit Aktoren kann die Fahrzeugbewegung beeinflusst werden. Weiterhin besitzt der Fahrer über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle die Möglichkeit, mit dem Assistenzsystem zu interagieren. Neben der Möglichkeit Fahrerwünsche vorzugeben, können dem Fahrer über diese Schnittstelle auch Informationen, Empfehlungen oder Systemzustände mitgeteilt werden. Die Kommunikation erfolgt dabei meist über optische, akustische, haptische oder kinästhetische Kanäle.

Abgesehen von der Ebene, auf der die Unterstützung geleistet wird, können Assistenzsysteme anhand des Unterstützungsgrades unterschieden werden. Naab und Reichart (1998) schlagen eine Aufteilung in Servosysteme, informierende Systeme, automatisch agierende und automatisch intervenierende Systeme vor:

- *Servosysteme* erleichtern die Bedienung der Stellelemente beispielsweise der Lenkung (Servolenkung) und der Bremse (Bremskraftverstärker).

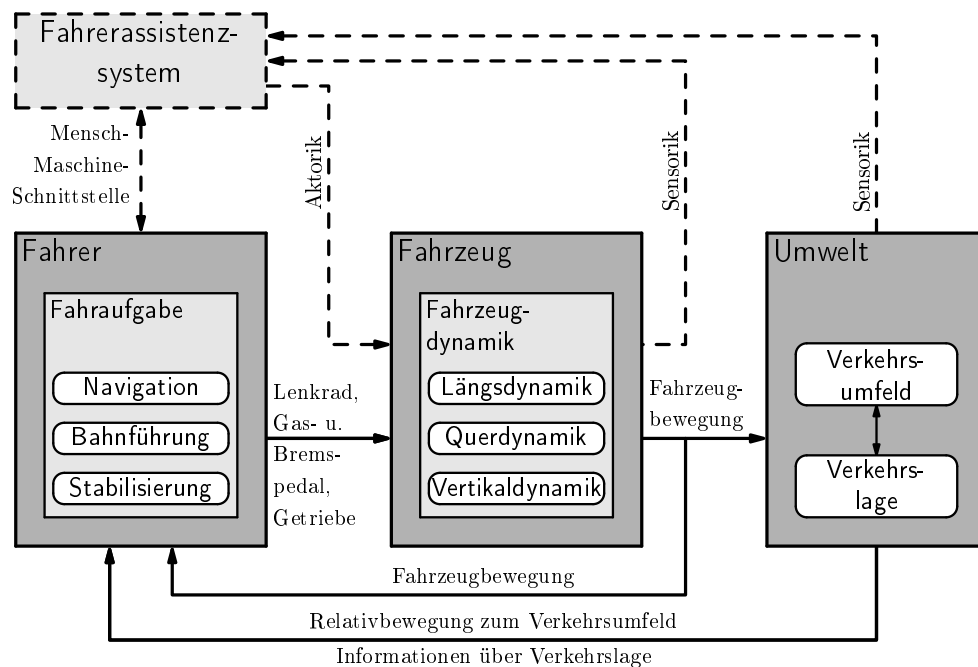


Abbildung 1.1: Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges (1982) erweitert um eine Fahrerassistenzebene.

- *Informierende Systeme* stellen dem Fahrer Informationen über die Fahrsituation, den Fahrzeugzustand oder die Verkehrslage zur Verfügung. Werden diese Informationen aufbereitet bzw. gewertet, können solche Systeme dem Fahrer Warnungen oder Empfehlungen über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle mitteilen.
- Die Gruppe der *automatisch agierenden Systeme* umfasst Assistenzsysteme, die Aktionen in bestimmten Bereichen der Fahrzeugführung automatisch ausführen – z. B. die Geschwindigkeitsregelung übernehmen. Der Fahrer muss solche Systeme aktivieren und überwachen.
- Im Gegensatz zu automatisch agierenden Systemen greifen *automatisch intervenierende Systeme* selbstständig in die Fahrzeugführung ein. Der Eingriff erfolgt in Situationen, die ein durchschnittlicher Fahrer nicht beherrschen kann, beispielsweise bei einer starken Bremsung auf einer Fahrbahn mit unterschiedlichen Reibwerten für die Räder der linken und rechten Seite.²

Siedersberger (2003) führt die Kategorie der *autonom agierenden Systeme* ein, bei denen eine Funktionsüberwachung durch den Fahrer nicht mehr notwendig ist. Prominente Beispiele solcher Systeme sind im Rahmen der von der DARPA (*Defence Advanced Research Projects Agency*) ins Leben gerufenen Wettbewerbe *Grand Challenge* und *Urban*

 $^2\mu$ -split Bremsung

Challenge entwickelt worden (Berger und Rumpe 2008; Bühler u. a. 2006). Offensichtlich handelt es sich bei solchen Systemen nicht um Fahrerassistenzsysteme.

Überblick über Fahrerassistenzsysteme

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit wird im folgenden Abschnitt ein Überblick über bereits für Serienfahrzeuge verfügbare bzw. sich derzeit in der Entwicklung befindende Systeme gegeben. Aus der vorangegangenen Betrachtung der Fahraufgabe ergeben sich Einsatzgebiete für Fahrerassistenzsysteme auf der Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene.

Navigationsebene Navigationssysteme unterstützen den Fahrer bei der Planung der Fahrtroute. Informationen über das Straßennetz erhalten solche Systeme über digitale Karten. Moderne Navigationssysteme berücksichtigen zudem aktuelle Verkehrsinformationen über den Warnfunkkanal einiger Radiosender (*Traffic Message Channel*, TMC) oder über Telematikdienste. Liegen Verkehrsstörungen vor, wird dynamisch eine Ausweichroute bestimmt. Bei der Umsetzung der geplanten Strecke werden dem Fahrer meist akustische und optische Anweisungen gegeben. Die Bestimmung der eigenen Position erfolgt größtenteils über GPS (*Global Positioning System*). Stehen kurzzeitig keine GPS-Daten zur Verfügung, z. B. in Häuserschluchten oder Tunneln, besteht die Möglichkeit, die Bestimmung der Fahrzeugposition odometrisch³ bzw. mit Hilfe von Inertialsystemen⁴ zu stützen.

Bahnführungsebene Auf der Ebene der Bahnführung kann zwischen Assistenz hinsichtlich der Längs- bzw. der Querführung unterschieden werden:

- *Längsführung*: In Längsrichtung kann die Aufgabe der Geschwindigkeitsregelung an eine Geschwindigkeitsregelanlage (GRA, auch Tempomat⁵) delegiert werden. Die Funktionalität solcher Systeme ist insbesondere auf viel befahrenen Straßen stark eingeschränkt, da Fremdfahrzeuge nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden sogenannte ACC⁶-Systeme entwickelt. Durch zusätzliche Sensorik erkennen solche Systeme vorausfahrende Fahrzeuge und halten einen vom Fahrer einstellbaren Abstand. Wird kein anderes Fahrzeug erkannt, wird die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers eingeregelt. Während frühere ACC-Systeme nur oberhalb einer Mindestgeschwindigkeit aktivierbar waren (meist über 30 km/h), beherrschen moderne Systeme das Anhalten hinter einem Vorderfahrzeug (*ACC-Follow-To-Stop*, *ACC-*

³Durch Messung der Raddrehzahlen lässt sich der zurückgelegte Weg bzgl. der letzten bekannten Position abschätzen.

⁴Die Fahrzeugbewegung wird anhand von Beschleunigungsmessungen geschätzt.

⁵Markenname der Daimler AG

⁶*Adaptive Cruise Control*

Full-Speed-Range). Heutige Systemgenerationen sind für den Betrieb auf Autobahnen und Schnellstraßen ausgelegt. Sie sollen hauptsächlich den Fahrkomfort erhöhen, indem sie den Fahrer von der Regelungsaufgabe der Fahrzeuglängsführung befreien. Indirekt ist eine Erhöhung der Sicherheit zu erwarten, da der Fahrer durch die Unterstützung bei niederen Regeltätigkeiten auch nach langen Fahrten entspannter ist. Weitere Sicherheitsgewinne können sich durch die Einhaltung von Sicherheitsabständen und durch verringerte Reaktionszeiten der elektronischen Komponenten ergeben. Demgegenüber steht eine eventuell gesteigerte Übernahmezeit des Fahrers in kritischen Situationen, die aus der Übertragung der Längsregelungsaufgabe auf das Assistenzsystem resultieren kann (Jürgensohn und Timpe 2000).

- **Querführung:** Zur Unterstützung des Fahrers bei der Querführungsaufgabe werden Informationen über den Verlauf des Fahrstreifens und der relativen Fahrzeugbewegung benötigt. Die Fahrstreifenerkennung wird häufig durch optische Sensoren realisiert. Diese Sensorik besitzt den Vorteil, ohne eine Anpassung der Infrastruktur auszukommen, da die Erkennung auf ohnehin vorhandenen Markierungen bzw. Fahrbahnabgrenzungen basiert. Alternativ besteht die Möglichkeit, einen Leitdraht bzw. punktuelle Markierungen wie z. B. Magneträgel oder RFID⁷-Transponder in die Fahrbahn einzulassen. Diese können mit entsprechenden Sensoren im Fahrzeug detektiert werden. Einsatzgebiete dieser Technologie sind beispielsweise der öffentliche Personentransport (autonome Spezialfahrzeuge im Eurotunnel, Götting 2001) und fahrerlose Transportfahrzeuge in Industrieanlagen. Wegen der hohen Kosten für eine flächendeckende Ausstattung des Straßennetzes ist ein solches Vorgehen nicht für den Individualverkehr geeignet. Der Unterstützungsgrad bei der Querführung reicht von optischen, akustischen oder haptischen Warnungen bei einem drohenden Verlassen des Fahrstreifens (*Lane Departure Warning*, LDW) über gerichtete Lenkimpulse bis hin zu einem kontinuierlichen Lenkradeingriff, durch den das Fahrzeug in der Fahrstreifenmitte gehalten wird (*Lane Keeping Support*, LKS; *Heading Control*, HC). In ähnlicher Weise kann der Fahrer bei Fahrstreifenwechselmanövern unterstützt werden. Ein Spurwechselassistent (SWA, *Lane Change Assistant*, LCA) überwacht den rückwärtigen Verkehr und warnt den Fahrer, wenn dieser ein Manöver einleitet, das zu einer Gefahrensituation führen würde. Dieses System lässt sich auf eine Fahrstreifenwechselunterstützung erweitern, bei der das Assistenzsystem in die Lenkung eingreift und die Durchführung des Manövers erleichtert.

Stabilisierungsebene Auf der Stabilisierungsebene wirkende Fahrerassistenzsysteme gehören meist zur Gruppe der automatisch intervenierenden Systeme. Sie benötigen keinerlei Informationen über die Umwelt oder andere Fahrzeuge, sondern verarbeiten ausschließlich zuverlässig erfassbare Sensordaten über das eigene Fahrzeug. Ein häufig in der Serienausstattung eines Fahrzeugs vorhandenes System ist das Antiblockiersystem (ABS), das die Lenkfähigkeit bei starken Verzögerungen gewährleisten soll. Dazu werden die Raddrehzahlen aller Räder überwacht. Droht ein Rad vollständig zu blockieren,

⁷Radio Frequency Identification

wird der Bremsdruck an dem entsprechenden Rad verringert. Analog verhindert eine Antriebsschlupfregelung (ASR) das Durchdrehen der Räder bei Anfahr- bzw. Beschleunigungsvorgängen. Es werden ebenfalls alle Räder einzeln überwacht und gegebenenfalls gebremst. Gleichzeitig wird die Motorleistung verringert. Das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) soll ein Schleudern oder ein Untersteuern des Fahrzeugs verhindern. Es basiert auf dem ABS, ist jedoch um einen Gierraten- und Lenkwinkelsensor erweitert. Anhand der Sensordaten wird der vom Fahrer gewünschte Kurs bestimmt. Erkennt das System ein mögliches Schleudern, wird das Fahrzeug durch gezieltes Bremsen einzelner Räder und Eingriffe in die Motorsteuerung stabilisiert. Das ESP wiederum kann um eine Zusatzfunktion erweitert werden, die das Fahren mit Anhängern sicherer macht (*Trailer Stability Assistant*, TSA), (Hübner und Becker 2008). Über die ESP-Sensorik werden vom Anhänger angeregte Schwingungen registriert. Die Gespannstabilisierung erfolgt über wechselseitige Bremseneingriffe an den Rädern der Vorderachse.

1.2 Motivation und Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll ein Assistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers auf Ebene der Bahnführung entworfen werden. Derzeit für Serienfahrzeuge erhältliche Systeme zur automatisierten Fahrzeugführung umfassen Längsführungs- und Querführungssysteme. Diese Systeme werden üblicherweise parallel betrieben, ohne dass Wechselwirkungen zwischen den Teilaufgaben der Fahrzeugführung bestehen. Während die Längsführung innerhalb der Systemgrenzen kontinuierlich von dem Fahrerassistenzsystem durchgeführt wird, beschränken sich heutige Querführungssysteme für Serienfahrzeuge hauptsächlich auf Fahrerhinweise bzw. auf Lenkeingriffe, wenn ein unbeabsichtigtes Verlassen des Fahrstreifens droht. Ansätze für integrierte Längs- und Querführungen im Rahmen von Forschungsprojekten werden in Kapitel 2.4 vorgestellt.

Das in dieser Arbeit zu entwerfende Fahrerassistenzsystem soll eine kontinuierliche Längs- und Querführung eines Fahrzeugs vornehmen. Einsatzgebiete dieses Systems sind Autobahnen und gut ausgebaute Landstraßen. Der Umsetzung des in dieser Arbeit beschriebenen Systems liegen folgende Ziele zugrunde:

- Es soll ein geeignetes Verfahren zur *Längs- und Querregelung* der Fahrzeugbewegung gefunden werden. Neben der separaten Längs- bzw. Querführung soll dieser Regelungsansatz auf eine *integrierte Längs- und Querführung* erweitert werden. Die Reglersynthese soll simulationsgestützt erfolgen. Hierzu sind Modelle der Fahrzeugbewegung herzuleiten.
- Die entworfenen Regelungssysteme sollen anhand *realer Fahrversuche* verifiziert werden. Hierzu ist die Implementierung eines Fahrerassistenzsystems für das Versuchsfahrzeug mit einem prototypischen Bedienkonzept erforderlich.

- Für den Fahrzeugaufbau sollen *seriennahe Komponenten* verwendet werden. Dies gilt insbesondere für die Sensorik zur Umfelderkennung und für die Aktorik zur Beeinflussung der Fahrzeugbewegung.

Bei der genannten Zielsetzung liegt der Schwerpunkt auf dem Entwurf von Regelungssystemen zur Fahrzeugführung. Ziel der Längsführung ist hierbei die Einstellung einer vom Fahrer vorgegebenen Wunschgeschwindigkeit bzw. das Einhalten eines einstellbaren Abstands zu einem langsamer fahrenden Vorderfahrzeug. Das benutzte Regelungsverfahren soll neben der Längsführung auch eine kontinuierliche Querführung entlang der Fahrstreifenmitte ermöglichen. Die Führungsfunktion soll in einem weiten Geschwindigkeitsbereich verfügbar sein, insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten. Für die Erweiterung der Regelung auf eine integrierte Längs- und Querführung soll eine implizite Kopplung der beiden Bewegungsrichtungen bestehen. Hieraus resultieren Vorteile bei der Nutzung des Assistenzsystems in komplexen Verkehrssituationen. Beispiele solcher Verkehrssituationen sind Ausweichmanöver, bei denen ein Ausweichen in Querrichtung bei gleichzeitiger Verzögerung in Längsrichtung erfolgt oder das in dieser Arbeit betrachtete Überholmanöver mit Fahrstreifenwechsel bei gleichzeitiger positiver Längsbeschleunigung. Durch die Integration soll sich in derartigen Situationen ein koordinierter Eingriff des Assistenzsystems in beiden Bewegungsrichtungen auf anschauliche Weise vorgeben lassen.

1.3 Vorgehensweise

Im Folgenden wird ein Überblick über die Vorgehensweise bei der Bearbeitung der genannten Ziele beschrieben. Abbildung 1.2 zeigt die inhaltliche Struktur der vorliegenden Arbeit. Horizontale Balken repräsentieren dabei einzelne Kapitel. In vertikaler Richtung erfolgt eine Unterteilung in drei Teilbereiche, die sich in den Kapiteln 2 bis 5 wiederfinden und Betrachtungen der Fahrzeuglängsbewegung, der Fahrzeugquerbewegung und die gleichzeitige Betrachtung der Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs umfassen. Neben diesen Themenfeldern existieren einführende und kontextbildende Textteile.

In Kapitel 2 wird zunächst in Abschnitt 2.1 ein Überblick über einige, für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen maßgebliche Forschungsprogramme gegeben. Im Anschluss werden Arbeiten vorgestellt, die sowohl im Rahmen dieser Forschungsprogramme als auch im Rahmen sonstiger Projekte entstanden sind und die anhand realer Fahrversuche erprobt wurden. Dabei befassen sich die Abschnitte 2.2 bis 2.4 mit Fahrzeugsystemen, die eine Längsführung, eine Querführung bzw. eine gleichzeitige Längs- und Querführung automatisiert durchführen.

Für den simulationsgestützten Reglerentwurf werden Modelle der Fahrzeugbewegung benötigt. Die Herleitung solcher Modelle wird in Kapitel 3 beschrieben. Der hierfür genutzte Ansatz zur Systemmodellierung wird in Abschnitt 3.1 erläutert. In den Abschnitten 3.2 bis 3.4 werden die Modelle der Längsbewegung, der Querbewegung sowie der Längs- und Querbewegung des Versuchsfahrzeugs dargestellt und validiert.

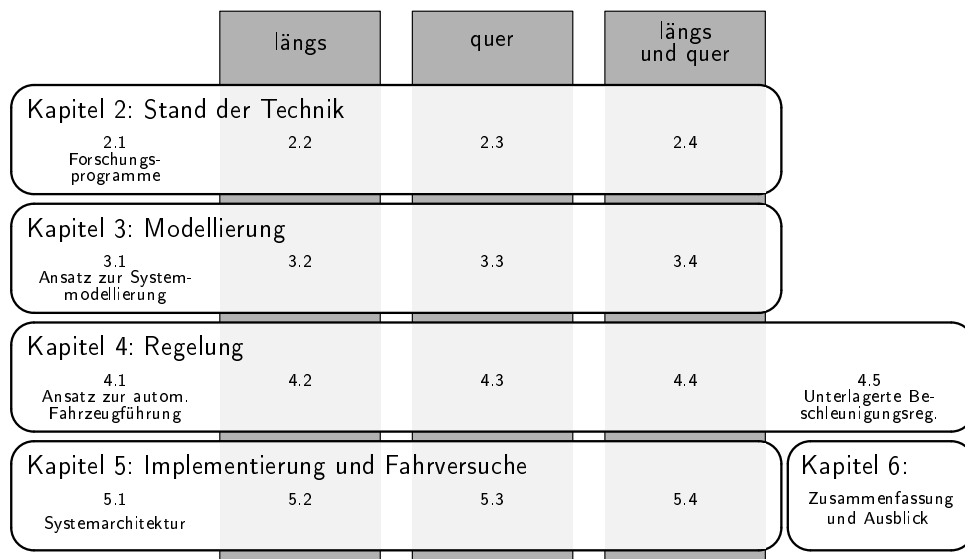


Abbildung 1.2: Inhaltliche Struktur der vorliegenden Arbeit.

Kapitel 4 stellt den Kernteil der Arbeit dar. In Abschnitt 4.1 wird der gewählte regelungstechnische Ansatz zur automatisierten Fahrzeugführung beschrieben. Dieser umfasst eine übergeordnete Regelungsschicht mit Reglern, die Soll-Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung erzeugen (Abschnitt 4.2 bis 4.4) und eine unterlagerte Regelungsschicht, in der die Beschleunigungsanforderungen in Stellsignale für die Fahrzeugaktuatorik umgesetzt werden (Abschnitt 4.5). Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Entwurf der übergeordneten Regelungen. Es werden Regler zur Längs- bzw. zur Querführung sowie zur integrierten Längs- und Querführung entworfen. Anhand der zuvor hergeleiteten Modelle werden diese Regelungen in Simulationen untersucht.

Nach den simulativen Betrachtungen erfolgt in Kapitel 5 eine Verifikation der entworfenen Regelungssysteme anhand von Fahrversuchen. Für den Betrieb in einem Versuchsfahrzeug ist die Implementierung in ein Fahrerassistenzsystem notwendig, dessen Systemarchitektur in Abschnitt 5.1 dargestellt ist. In den Abschnitten 5.2 bis 5.4 wird das Systemverhalten anhand von Szenarien zur Längs- und Querführung sowie anhand eines komplexen Szenarios zur integrierten Längs- und Querführung durch Beispielmanöver veranschaulicht.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine Zusammenfassung in Kapitel 6, in dem ebenfalls ein Ausblick auf zukünftige Aufgabenstellungen gegeben wird.

Kapitel 2

Stand der Forschung

Eine hinreichend fortgeschrittene Technologie läßt sich nicht mehr von Zauberei unterscheiden.

(Arthur C. Clarke, 1917-2008)

In Kapitel 1 wurde ein Überblick über mögliche Einsatzgebiete für Fahrerassistenzsysteme gegeben. Aus der ebenfalls in diesem Kapitel formulierten Motivation und Zielsetzung wird deutlich, dass für die vorliegende Arbeit Systeme relevant sind, die sich mit einer Automatisierung der Fahrzeugführung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung befassen. Aufgrund der Vielzahl an Aktivitäten im Bereich der automatisierten Fahrzeugführung und der eingeschränkten Aussagekraft von Simulationen für reale Fahrszenarien werden schwerpunktmäßig Ergebnisse berücksichtigt, die anhand von Fahrversuchen gewonnen wurden.

In Abschnitt 2.1 werden zunächst internationale Forschungsprogramme vorgestellt, die grundlegend für die Entwicklung von Assistenzsystemen sind und den Rahmen für automatisierte Fahrzeugsysteme bildeten.

Anschließend werden in Abschnitt 2.2 sowohl mögliche Aktoren und Sensoren als auch verschiedene Regelungsansätze für die automatisierte Längsführung vorgestellt.

Ein Überblick über Aktoren, Sensoren und Regelungsansätze zur automatisierten Querrführung wird in Abschnitt 2.3 gegeben.

In Abschnitt 2.4 werden Forschungsaktivitäten aufgeführt, in denen eine gleichzeitige Betrachtung der Längs- und Querrführung erfolgt.

2.1 Forschungsprogramme

Sowohl in Europa als auch in den USA und Japan wurden großangelegte Forschungsprogramme zur Steigerung der Verkehrseffizienz und zur Verbesserung der Sicherheit

bzw. des Fahrkomforts im Straßenverkehr mit Hilfe von Fahrerassistenzsystemen durchgeführt. Bei grundlegend gleicher Zielsetzung wurden unterschiedliche Verkehrsszenarien betrachtet. In europäischen Projekten wird überwiegend von einem gemischten Betrieb von Fahrzeugen, die mit Assistenzsystemen zur Fahrzeugführung ausgerüstet sind, und manuell geführten Fahrzeugen ausgegangen (*mixed mode*). Informationen über das Umfeld werden hierbei meist durch fahrzeugeigene Sensoren gewonnen, so dass eine Erweiterung der Infrastruktur nicht notwendig ist. Demgegenüber bauen viele amerikanischen Forschungsvorhaben auf dem Konzept eines Fahrstreifens eigens für vollautomatisierte Fahrzeuge auf. In Japan wird eine rasche Einführung von meist informativen bzw. warnenden Assistenzsystemen angestrebt. Zu diesem Zweck werden auch großflächige infrastrukturelle Maßnahmen umgesetzt.

PROMETHEUS (Europa) Das im Zeitraum von 1986 bis 1994 durchgeführte europäische Forschungsprojekt PROMETHEUS („*Program for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety*“) hatte zum Ziel, „Konzepte und Lösungen zu schaffen, die den Weg zu einem flüssigen Straßenverkehr hoher Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit mit bisher noch nie erreichter Sicherheit weisen“ (Voy u. a. 1987). Durch firmenübergreifende Programme sollte weiterhin eine frühzeitige Harmonisierung und Standardisierung der künftigen Systeme erzielt werden. Aus den Interaktionsmöglichkeiten der Systeme durch aktive Kommunikation mit der Infrastruktur oder mit anderen Fahrzeugen bzw. durch die Umfeldwahrnehmung mit fahrzeugeigener Sensorik ergaben sich die von industriellen Forschungsgruppen bearbeiteten Unterprojekte

- *PRO-ROAD* (Kommunikation zwischen Fahrzeug und Umgebung),
- *PRO-NET* (Kommunikation zwischen Fahrzeugen) und
- *PRO-CAR* (Fahrerinformations- und -assistenzsysteme).

Innerhalb staatlicher und universitärer Forschungseinrichtungen wurden die Unterprojekte

- *PRO-ART* (Systeme der künstlichen Intelligenz),
- *PRO-CHIP* (Implementierung intelligenter Systeme),
- *PRO-COM* (Entwicklung von Kommunikationssystemen) und
- *PRO-GEN* (Simulation von Verkehrssituationen)

durchgeführt. Arbeiten, die in engem Zusammenhang mit dem Entwurf von automatischen Steuerungen und Regelungen von Fahrzeugen stehen, wurden in der industriellen Forschung schwerpunktmäßig im Unterprojekt PRO-CAR und in den Forschungseinrichtungen in den Unterprojekten PRO-ART und PRO-CHIP realisiert.

Im Rahmen von PROMETHEUS wurden mit der Funktion „*Autonomous Intelligent Cruise Control*“ erste ACC-Systeme entwickelt, die für den Einsatz auf Autobahnen und gut

ausgebauten Landstraßen geeignet waren. Diese Prototypen lieferten grundlegende Erkenntnisse für die Markteinführung von ACC-Systemen (Braess 2003). Neben der Unterstützung bei der Längsführung wurden ebenfalls Versuchsfahrzeuge mit automatisierter Querführung vorgestellt (Broggi u. a. 1999a). In der Funktion „Hindernisvermeidung“ wurden Versuchsfahrzeuge entwickelt, die eine automatisierte Längs- und Querführung kombinierten (Weilkes 2000; Enkelmann 1997; Brüdigam 1994).

MOTIV (Deutschland) Im Anschluss an PROMETHEUS wurde in den Jahren 1996 bis 2000 das Forschungsprogramm MOTIV („Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr“) durchgeführt. Ausgehend von den Aufgabenstellungen in PROMETHEUS wurde das Ziel verfolgt, Mobilität trotz steigendem Verkehrsaufkommens zu erhalten und gleichzeitig die negativen Folgen des Verkehrs auf Menschen und Umwelt deutlich zu reduzieren. Dieses Ziel sollte durch eine erhöhte Effizienz des Transportnetzwerks erreicht werden. Neben der Optimierung der einzelnen Verkehrsträger ging es dabei ebenso um ein tieferes Verständnis von Mobilität und Verkehr an sich. Vor diesem Hintergrund ergaben sich die beiden Teilprogramme „Sichere Straße“ und „Mobilität in Ballungsräumen“.

Durch die Betrachtung der Verkehrssituation in Ballungsräumen wurde die Funktionalität der Längsführungsassistenz im Unterprojekt „ACC im Ballungsraum“ (ACC^{iB}) deutlich erweitert. Die entworfenen Regelstrategien ermöglichten den Einsatz von ACC-Systemen im niederen Geschwindigkeitsbereich sowie bei *Stop & Go*-Verkehr. Im Gegensatz zu bisherigen ACC-Ausprägungen konnten diese Systeme automatisiert Anhalte- und Anfahrmanöver durchführen. Hierzu wurde eine erweiterte Umfeldsensorik benötigt, die insbesondere Informationen über versetzt fahrende Fahrzeuge im Nahbereich lieferte (Ehmanns u. a. 2000; Venhovens u. a. 2000). Abschließend wurden die Auswirkungen auf den Verkehrsablauf und den Treibstoffverbrauch für unterschiedliche Systemauslegungen untersucht sowie das Nutzen- und Sicherheitspotenzial abgeschätzt (Haller 2001; Nirschl und Kopf 1997).

Ein weiteres Forschungsfeld im Rahmen von MOTIV war die Umsetzung einer „Abbiege- und Spurwechselassistenz“ (ASA). Diese sollte den Fahrer durch optische, akustische oder haptische Signale vor kritischen, innerstädtischen Abbiege- bzw. gefährlichen Spurwechselmanövern auf Autobahnen warnen. Die Realisierung dieser Funktionen erforderte ein erweitertes Verständnis der Verkehrssituation und Informationen über Verkehrsteilnehmer im Fahrzeugumfeld, insbesondere in den Nachbarfahrstreifen. In diesem Zusammenhang wurde eine geeignete Umfeldsensorik und eine Mensch-Maschine-Schnittstelle entwickelt (Hoffmann 2006; MOTIV 2000).

INVENT (Europa) Als MOTIV-Nachfolge wurde 2001 das auf vier Jahre angesetzte Forschungsprojekt INVENT („Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik“) initiiert. Insgesamt 24 Projektpartner untersuchten die drei Schwerpunktbereiche „Fahrerassistenz, aktive Sicherheit“ (FAS), „Verkehrsmanagement 2010“ (VM2010) und „Verkehrsmanagement in Transport und Logistik“ (VMTL) mit den acht Teilprojekten

- Fahrumgebungserfassung und Interpretation,
- vorausschauende aktive Sicherheit,
- Stauassistentz,
- Fahrerassistenz und Mensch-Maschine-Interaktion,
- verkehrliche Wirkung, Recht und Akzeptanz,
- Verkehrsleistungsassistentz,
- Netzausgleich Individualverkehr und
- Verkehrsmanagement in Transport und Logistik.

Die allgemeinen Ziele waren die Erhöhung der Verkehrssicherheit, die Optimierung des Verkehrsflusses sowie ein Ausgleich zwischen individuellen und gesellschaftlichen Zielen bei der Verkehrsabwicklung. Weiterhin sollte die Selbstorganisation des Verkehrs durch Informationen im Verkehrsnetzwerk gesteigert und die entwickelten Systeme nutzergerecht gestaltet werden.

Bezüglich der Unterstützung bei der Längs- und Querverführung ist das FAS-Teilprojekt „Stauassistent“ (STA) hervorzuheben. Ziel war die Realisierung einer Längs- und Querunterstützung in Stausituationen, d. h. im niederen Geschwindigkeitsbereich auf Autobahnen. Von den entwickelten Systemen wurden Einsparungen im Kraftstoffverbrauch und ein verbesserter Verkehrsablauf durch gleichmäßige Geschwindigkeitsprofile erwartet. Die Funktionalität des Stauassistenten umfasste das Abstandhalten, Beschleunigen und Verzögern hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug bis zum Stillstand bei gleichzeitiger Querverführungsunterstützung innerhalb des eigenen Fahrstreifens.

Die Wahl des Einsatzszenarios gewährleistete eine begrenzt komplexe Umgebung. Anhand von Messfahrten wurden Stausituationen klassifiziert und darauf aufbauend Längs- und Querregelungssysteme entworfen. Um die erhoffte Harmonisierung des Verkehrsflusses zu erzielen, wurden prädiktive Ansätze für die Fahrzeuglängsführung untersucht. Diese basierten einerseits auf vorausschauender Umfeldsensorik, andererseits auf der klassifizierten Verkehrssituation. Für die Querregelung wurden konventionelle Ansätze zur Spurhaltung gewählt. Hierbei wurde anhand der Position im Fahrstreifen und der Fahrbahnkrümmung sowie der Krümmungsänderung ein Soll-Lenkwinkel generiert (Mayr 2001).

In Zusammenarbeit mit anderen INVENT-Teilprojekten wurden weitere Fragestellungen wie z. B. Zulassungs- und Einführungsfragen sowie die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion behandelt. Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene Systemausprägungen untersucht. Beispielsweise reichte der Grad der Querverführungsunterstützung von Lenkeingriffen mit Führungsmoment bis hin zur vollständig automatisierten Querverführung. Weiterhin wurden unterschiedliche Aktivierungsschemata hinsichtlich der Kopplung zwischen Längs- und Querverführung erprobt. Die Akzeptanz der verschiedenen Varianten wurde anhand von Befragungen und Fahrversuchen ermittelt.

AKTIV (Deutschland) Nach Abschluss von INVENT startete im September 2006 das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprogramm AKTIV („Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr“). In den drei Projekten „Verkehrsmanagement“ (VM), „Aktive Sicherheit“ (AS) und „Cooperative Cars“ (CoCar) sollen bis zum Jahr 2010 Lösungen für eine erhöhte Verkehrssicherheit und einen optimierten Verkehrsfluss erarbeitet werden. Die weitere Untergliederung der AKTIV-Projekte in Teilprojekte ist in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Die Entwicklung neuartiger Fahrerassistenzsysteme sowie die Verbesserung bereits existierender Systeme erfolgt in dem Projekt „Aktive Sicherheit“. Hinsichtlich der Längsführung soll in dem Teilprojekt „Aktive Gefahrenbremsung“ ein automatisches Notbremssystem zur Vermeidung von Auffahrunfällen entworfen werden. Wird eine kritische Situation erkannt, wird zunächst eine an den Fahrer gerichtete, situationsgerechte Warnung ausgegeben. Eskaliert die Situation, wird durch das System eine angemessene Bremsung zur Unfallvermeidung eingeleitet. Voraussetzung für ein solches Vorgehen ist eine korrekte Erfassung und Interpretation der Fahrzeugumgebung. Weiterhin kann die direkte oder indirekte Beobachtung des Fahrers Aufschlüsse über dessen Aufmerksamkeit geben und das Systemverhalten beeinflussen.

Die Erweiterung der Querführungsassistenz auf eine kontinuierliche Unterstützung in einem weiten Geschwindigkeitsbereich wird im Teilprojekt „Integrierte Querführung“ behandelt. Durch zusätzliche, hauptsächlich bildgebende Sensorik wie Stereo-Kamerasysteme, soll die Verfügbarkeit auch in Staus bzw. Baustellen gewährleistet werden. Der Grad der Unterstützung ist dabei abhängig von der gegenwärtigen Verkehrssituation und der Aufmerksamkeit des Fahrers.

Die in AKTIV-AS entworfenen Fahrerassistenzsysteme sollen in gefährlichen Situationen rechtzeitig und wirksam eingreifen, sich unter normalen Bedingungen jedoch im Hintergrund halten. Das Querschnittsprojekt „Fahrsicherheit und Aufmerksamkeit“ hat zur Aufgabe, die Fahreraufmerksamkeit zu erfassen und daraus angemessene Verhaltensweisen der Assistenzsysteme abzuleiten bzw. unter Einbeziehung des Fahrerzustands eine Bewertung der Fahrsituation vorzunehmen. Die Unterstützung bei der Fahrzeugführung kann dadurch situations- und fahreradaptiv erfolgen.

PROMOTE CHAUFFEUR, KONVOI (Europa, Deutschland) Auf Initiative der damaligen Daimler-Benz AG wurde 1996 das europäische Verbundprojekt PROMOTE CHAUFFEUR I ins Leben gerufen. Beschäftigten sich andere Forschungsprojekte wie PROMETHEUS und MOTIV hauptsächlich mit der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für PKW, war die Zielsetzung in CHAUFFEUR I, Lösungen für die automatisierte Führung von LKW-Kolonnen hinter einem manuell oder automatisch gesteuerten Führungsfahrzeug zu erarbeiten. Geringe Abstände zwischen den Fahrzeugen einer Kolonne erhöhen die Straßenkapazität

| AKTIV | | |
|---|--|--|
| Verkehrsmanagement | Aktive Sicherheit | Cooperative Cars |
| <ul style="list-style-type: none">• Netzoptimierer• Virtuelle Verkehrsbeeinflussungsanlage• Kooperative Lichtsignalanlage• Adaptive Navigation• Störungsadaptives Fahren• Informationsplattform• Kooperations- und Innovationsforen• Bewertung | <ul style="list-style-type: none">• Aktive Gefahrenbremsung• Integrierte Quertürrung• Kreuzungsassistentz• Sicherheit für Fußgänger und Radfahrer• Fahrsicherheit und Aufmerksamkeit | <ul style="list-style-type: none">• Kommunikationsprotokolle• Prototypen und Innovationspotenzial |

Tabelle 2.1: Projektstruktur des Forschungsprogramms AKTIV (Aktiv 2006).

und führen durch das Fahren im Windschatten zu einer Kraftstoffersparnis.⁸ Weiterhin wird das Fahrpersonal entlastet, sodass längere Strecken zurückgelegt werden können und sich Personalkosten einsparen lassen. Ebenso wird von einer Reduktion des Unfallrisikos ausgegangen (Gehring 2000). Die Zielsetzung lehnt sich an das amerikanische PATH-Projekt an, allerdings wurde bewusst eine möglichst kostengünstige und flexible Umsetzung angestrebt, die für eine kommerzielle Markteinführung geeignet ist. Von einer Ausrüstung der Infrastruktur z. B. mit Magnethägeln oder einer Fahrzeug-Straße-Kommunikation wurde deshalb abgesehen.

Zur Bestimmung des Abstands und der Querablage bezüglich eines Vorderfahrzeugs wurden in CHAUFFEUR I zwei CCD⁹-Kameras genutzt. Die Längs- und Querführung erfolgte nach dem *Vehicle-Follower*-Prinzip, bei dem jedes Fahrzeug seine Position relativ zum Vorderfahrzeug regelt, also an einer virtuellen Deichsel geführt wird (*electronic towbar*). Im Gegensatz zum *Point-Follower*-Prinzip, das eine Regelung der absoluten Fahrzeugposition unabhängig von anderen Fahrzeugen vorsieht, sind bei dieser Vorgehensweise Untersuchungen der Kolonnenstabilität sowohl in Längs- als auch in Querrichtung erforderlich.

Nach einer Abschlussdemonstration im Juni 1999 wurden die Arbeiten im Rahmen des Projekts CHAUFFEUR II fortgesetzt. Das Deichselprinzip wurde auf LKW-Konvois ausgedehnt und um eine bidirektionale Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation erweitert. Eine Demonstration erfolgte im Mai 2003 (Zambou 2005). Die CHAUFFEUR-Nachfolge trat ab 2005 die BMWi geförderte Forschungsinitiative KONVOI an. Bis zum Frühjahr 2008 sollten neben der Funktionsentwicklung zur automatisierten Längs- und Querführung von LKW-Konvois auch die Auswirkungen solcher Konvois auf den restlichen Verkehr sowie rechtliche Aspekte der Nutzung derartiger Systeme untersucht werden. Zur Entwicklung von Markteinführungsszenarien wurden Akzeptanzuntersuchungen bei Spediteuren, LKW- und PKW-Fahrern durchgeführt (Deutschle 2006).

PATH (USA) Beinahe zeitgleich mit PROMETHEUS wurde 1986 das Großprojekt PATH (*„Partners for Advanced Transit and Highways“*) von der *University of California* und dem kalifornischen Verkehrsministerium *Caltrans* ins Leben gerufen.^{10,11} Das PATH-Projekt spielt eine führende Rolle in dem auf US-Bundesebene durchgeführten ITS-Programm¹² (*„Intelligent Transportation Systems“*), in dem alle amerikanischen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in den Bereichen der Fahrzeugtechnik und der Verkehrsführung zusammengefasst werden (Mayr 2001; Chee und Tomizuka 1997). Das PATH-Projekt besitzt darüberhinaus enge Berührungspunkte mit dem AHS-Programm (*„Automated Highway*

⁸Die Kraftstoffersparnis beträgt ca. 13% bei einem Abstand von 30m und einer Geschwindigkeit von 80 km/h (Gehring 2000).

⁹*Charge-coupled Device*

¹⁰<http://www.path.berkeley.edu>

¹¹Ausführliches Archiv an Forschungsberichten unter <http://database.path.berkeley.edu/reports>

¹²Früher IVHS (*„Intelligent Vehicle Highway Systems“*)

Systems“), über das Aktivitäten im Bereich der automatisierten Fahrzeugführung abgewickelt werden (Horowitz 1997).

Die interdisziplinäre Forschung im Rahmen von PATH ist in vier Teilbereiche untergliedert:

- Öffentliche Wahrnehmung und Auswirkungen neuer Verkehrstechnologien sowie Abschätzung staatlicher Maßnahmen zur Verkehrsregulierung („*Policy and Behavioral Research*“),
- Entwurf von Sicherheitssystemen hauptsächlich für Schnellstraßen („*Transportation Safety Research*“),
- Verkehrsmanagement/-überwachung und Fahrerinformation („*Traffic Operations Research*“) und
- Ausbau und Weiterentwicklung öffentlicher Verkehrsmittel („*Transit Operations Research*“).

Das Ziel ist die Entwicklung innovativer Konzepte, mit denen das ständig wachsende Verkehrsaufkommen in Kalifornien und dessen negative Folgen bewältigt werden können. In einer bundesweiten Zusammenarbeit von Universitäten, der Automobil- und Zulieferindustrie sowie staatlichen Einrichtungen werden Strategien und Technologien zur Erhaltung der Mobilität und zur Steigerung der Verkehrssicherheit untersucht.

Um die Straßenkapazität zu erhöhen, wird im Rahmen des Teilbereichs „*Transportation Safety Research*“ das Szenario verfolgt, einen eigenen Fahrstreifen für automatisierte Fahrzeuge einzuführen.¹³ In diesem Fahrstreifen sollen Fahrzeugkolonnen (*platoons*) gebildet werden. Aufgrund der Automatisierung der Fahrzeugführung können die Abstände zwischen den Fahrzeugen einer Kolonne und die Breite der Fahrstreifen reduziert werden. Nach Varaiya (1993) könnte der Fahrzeugdurchsatz durch diese Maßnahme um das bis zu Dreifache gesteigert werden. Neben dem Automatisierungsgrad bei der Längs- und Querführung, der eingesetzten Sensorik und der Möglichkeit einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation¹⁴ sind spezielle Manöver wie das Zusammenführen oder Trennen einzelner Fahrzeuge und einer Kolonne sowie das Verhalten des Führungsfahrzeugs einer Kolonne Forschungsgegenstand verschiedener PATH-Projekte (Bose und Ioannou 2001; Horowitz und Varaiya 2000; Frankel u. a. 1994; Godbole und Lygeros 1993). Ein wichtiger Aspekt bei der Längsregelung ist die Kolonnenstabilität (Swaroop 1994). Kolonnenstabilität ist gegeben, wenn sich Störungen entlang der Fahrzeugschlange nicht verstärken. Durch diesbezügliche Betrachtungen sollen Unfälle innerhalb eines *platoons* vermieden werden. Störungen können beispielsweise durch Manöver des Führungsfahrzeugs bzw. durch Ein- und Ausscherer gegeben sein.

¹³Diese Konzeption lehnt sich an sog. *carpool lanes* an, die bereits heute auf amerikanischen Freeways vorhanden sind. *Carpool lanes* dürfen nur dann benutzt werden, wenn sich mindestens ein Beifahrer im Fahrzeug befindet. Dadurch soll die Bildung von Fahrgemeinschaften angeregt und das Verkehrsaufkommen verringert werden.

¹⁴Vgl. *Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC* (Girard u. a. 2002; Jones 2001)

Neben der Regelung einzelner Fahrzeuge und der Organisation in Fahrzeugkonvois wurden im PATH-Programm auch makroskopische Untersuchungen zur Optimierung des Verkehrsflusses durch Variation der Größe und der Geschwindigkeit der Kolonnen durchgeführt (Shladover 1992).

AHSRA (Japan) In Japan wurden 1996 unter der Federführung des „Ministry of Land, Infrastructure and Transport“ (MLIT) die Forschungsaktivitäten im Bereich der Verkehrs- und Verkehrsträgoptimierung im Rahmenprogramm AHSRA¹⁵ („Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association“) zusammengefasst (Shladover u. a. 2001). Beteiligt sind neben Unternehmen aus der Automobil- und Kommunikationsindustrie auch universitäre und staatliche Einrichtungen. Wie auch bei den europäischen und amerikanischen Forschungsprogrammen ist die allgemeine Zielsetzung eine Verbesserung der Verkehrssicherheit sowie eine Komfort- und Effizienzsteigerung. Bei der Umsetzung dieser Ziele wird das Gesamtkonzept intelligenter Autos („Smart Cars“) auf intelligenten Straßen („Smartway“) verfolgt, die miteinander kommunizieren können („Smart Gateway“).

Die fahrzeugseitigen Assistenzfunktionen werden im AHSRA-Programm anhand des Unterstützungsgrades unterschieden:

- **AHS-i (Information):** Der Fahrer erhält durch Kommunikation mit der Infrastruktur Informationen über das Verkehrsgeschehen und den Zustand der Fahrbahnoberfläche. In kritischen Situationen, beispielsweise der Annäherung an ein Stauende oder bei Fahrbahnglätte, wird der Fahrer gewarnt.
- **AHS-c (Control):** Das Assistenzsystem greift automatisch in die Fahrzeugführung ein, z. B. wenn ein Auffahrunfall bei schlechten Sichtverhältnissen oder ein Abkommen von der Fahrbahn aufgrund überhöhter Geschwindigkeit bzw. Unaufmerksamkeit droht. Ebenso wird an einer Unterstützung bei Einfädelvorgängen an Auf- und Abfahrten gearbeitet.
- **AHS-a (Automated Cruise):** Die letzte Ausbaustufe sieht, ähnlich wie im PATH-Programm, eine vollständige Automatisierung der Fahrzeugführung vor. Es werden Ansätze zur Konvoibildung und zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation verfolgt.

Das AHSRA-Programm ist auf einen möglichst frühzeitigen Einsatz der entwickelten Technologien ausgerichtet. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten nicht auf der Automatisierung von Fahrzeugen, sondern auf der flächendeckenden Ausrüstung des Straßennetzes mit Sensoren, Informations- und Administrationseinrichtungen (Yamawaki u. a. 2000). Beispiele für bereits großflächig eingesetzte Systeme dieser Art sind das ETC (*Electronic Toll Collection*), mit dem sich anfallende Mautgebühren komfortabel begleichen lassen und VICS¹⁶ (*Vehicle Information and Communication System*), über das dynamisch Verkehrsinformationen und Routenempfehlungen zur Umgehung von Behinderungen empfangen werden können.

¹⁵<http://www.ahsra.or.jp/eng>

¹⁶<http://www.vics.or.jp/english/>

2.2 Längsführung

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über den Stand der Technik hinsichtlich einer automatisierten Fahrzeuglängsführung. Die Längsführung beinhaltet im Falle der freien Fahrt eine Geschwindigkeits-, bei Störung durch ein Vorderfahrzeug zusätzlich eine Abstandsregelung. Ein Vorderfahrzeug wird als Störung betrachtet, wenn es sich auf der geplanten Fahrtroute befindet und sich zudem langsamer als mit der vom Fahrer eingestellten Wunschgeschwindigkeit bewegt. In einer solchen Situation besteht die Aufgabe des Assistenzsystems darin, einen fahrerseitig vorgegebenen Abstand einzuhalten. Ist für die Abstandsregelung kein relevantes Fahrzeug vorhanden, z. B. nach einem Fahrstreifenwechsel des Vorderfahrzeugs, wird auf die zuvor eingestellte Wunschgeschwindigkeit beschleunigt.

In Abschnitt 2.2.1 werden Aktoren zur Beeinflussung der Längsdynamik und Sensoren zur Erkennung des gegenwärtigen Fahrzeugzustands sowie der Fahrzeugumgebung vorgestellt.

Anschließend wird in Abschnitt 2.2.2 ein Überblick über bestehende Ansätze zur Längsdynamikregelung gegeben.

2.2.1 Aktorik und Sensorik für die Längsführung

Aktorik Im einfachsten Fall erfolgt der Eingriff in die Längsdynamik ausschließlich über die Regulierung der Antriebsleistung. Verzögerungen werden hierbei durch das Schleppmoment des Motors und sonstige Fahrwiderstände realisiert (Fritz 2002; Dorißen u. a. 1994; Nöcker 1990). Die auf diese Weise erzielten Verzögerungen sind in den meisten Fällen für Geschwindigkeitsregelanlagen ausreichend.¹⁷ Um die Anforderungen einer Abstandsregelung zu erfüllen, kommen jedoch überwiegend aktive Bremssysteme zum Einsatz. Hartwich (1974) beschreibt eine Ansteuerung des Gas- und Bremspedals über pneumatische Stellglieder. Im Gegensatz zu diesem frühen Ansatz wird die Antriebsleistung bei heutigen Systemen meist durch elektronisch ansprechbare Stellglieder gesteuert und ist damit durch direkte Vorgaben eines Assistenzsystems beeinflussbar. Zur Umsetzung von Verzögerungen sind zwei Vorgehensweisen verbreitet. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung eines aktiven Unterdruckbremskraftverstärkers. Ist das Fahrzeug mit ESP ausgerüstet, stellt die Mitbenutzung der ESP-Aktorik eine kostengünstige Alternative dar. Im Falle eines Bremseingriffs wird durch eine Pumpe ein Überdruck erzeugt, der über eine Ventilsteuerung gezielt an den einzelnen Rädern als Bremsdruck aufgebracht werden kann. Gerdes (1996) setzt einen Bremsaktor ein, der über ein separates hydraulisches System einen zusätzlichen Bremsdruck dem vom Fahrer erzeugten Bremsdruck überlagert. Dabei wurde sichergestellt, dass die Aktorik dem vom Fahrer aufgetragenen Eingriff

¹⁷Bei steilen Bergabfahrten kann es dazu kommen, dass die gewünschte Verzögerung nicht ohne aktive Bremsingriffe erzielt werden kann.

nicht entgegen wirken kann, der Fahrer also immer in der Lage ist, stärker als der Aktor zu bremsen.

Sensorik Für eine automatisierte Geschwindigkeitsregelung wird die Kenntnis der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit vorausgesetzt. Diese kann über Impulsgeber geschätzt werden, die Auskunft über die momentanen Raddrehzahlen geben. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist geschwindigkeitsabhängig und ist bei niedrigen Geschwindigkeiten sowie bei Fahrten mit großem Schlupf unzureichend. Für eine Abstandsregelung werden zusätzliche Informationen über das Fahrzeugumfeld benötigt. Insbesondere der Abstand und die Relativgeschwindigkeit bezüglich eines relevanten Vorderfahrzeugs sind dabei von Bedeutung. Zur berührungslosen Messung dieser Größen haben sich im Serieneinsatz RADAR- bzw. LIDAR-Sensoren (*Radio/Light Detection and Ranging*) etabliert. RADAR-Systeme emittieren elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von 76-77 GHz bzw. 24 GHz. Die an Objekten reflektierten Wellen werden detektiert und über eine Laufzeitmessung zur Berechnung des Abstands genutzt. Eine durch den Doppler-Effekt gegebenenfalls hervorgerufene Frequenzverschiebung des empfangenen Signals gibt gleichzeitig Aufschluss über die relative Geschwindigkeit des Objekts. Im Falle der LIDAR-Sensorik werden zur Abstandsmessung Laserstrahlen gesendet und der Abstand ebenfalls durch eine Laufzeitmessung der Reflexionen bestimmt. Die Nutzung des Doppler-Effekts ist bei dieser Sensorart nicht praktikabel, so dass die Bestimmung der Relativgeschwindigkeit durch Differentiation der Abstandswerte erfolgt. Eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der beiden Sensorsysteme basierend auf Stiller (2005) ist in Tabelle 2.2 aufgeführt. Eine weitere Möglichkeit zur Abstandsbestimmung ist die Verarbeitung von Kamerabildern. Besonders stereoskopische Kamerasysteme sind zur Objekterkennung geeignet, da sie Höheninformationen aus zwei örtlich versetzt aufgenommen Bildern extrahieren können. Gegenüber RADAR- oder LIDAR-Sensoren besitzen Kamerasysteme jedoch deutlich geringere Reichweiten und liefern ungenauere Abstands- und Relativgeschwindigkeitsmessungen. Vorteilhaft ist die Möglichkeit einer exakten Bestimmung der lateralen Objektposition. Kamerabasierte Sensoren eignen sich deshalb hauptsächlich zur Stützung der über RADAR- bzw. LIDAR-Sensoren erhaltenen Messwerte und bei der Beurteilung, ob ein erkanntes Objekt für die Abstandsregelung relevant ist.

2.2.2 Ansätze zur Regelung der Längsdynamik

Die Dynamik des Fahrzeugs ist stark nichtlinear. Beispielsweise setzt sich der Antriebstrang aus Komponenten zusammen, die nichtlineares Verhalten aufweisen. So ergibt sich für den Verbrennungsmotor ein drehzahlabhängiges Ausgangsmoment, das von der Dynamik des Motormanagements beeinflusst wird und über ein Getriebe und elastische Wellen auf die Reifen übertragen wird. Auch die Ansteuerung des Bremssystems weist ein nichtlineares Verhalten beim Druckaufbau im hydraulischen System und bei der Bremswirkung am Rad auf. Weitere Nichtlinearitäten werden durch geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstände wie z. B. dem Luftwiderstand oder der Rollreibung in das System eingebracht.

| RADAR | LIDAR |
|--|---|
| + Robust gegenüber Witterungsbedingungen und Verschmutzung | + Kostengünstige Produktion |
| + Große Reichweite | + Gute Winkelauflösung, Lateralgeschwindigkeit besser schätzbar |
| + Gleichzeitige Messung von Abstand und Relativgeschwindigkeit | + Großer Erfassungswinkel |
| – Hohe Produktionskosten | + Erkennung von Sichtbeeinträchtigungen |
| – Schlechte Winkelauflösung | – Anfällig für Verschmutzung und Sichteinschränkungen |
| – Im Allg. kleiner Erfassungswinkel | – Relativgeschwindigkeit durch Ableitung des Abstands |
| – Keine Erkennung von Sichtbeeinträchtigungen | |

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung von Eigenschaften der RADAR- und LIDAR-Sensoren für die automatisierte Abstandsregelung (Stiller 2005).

Neben der komplexen Systemdynamik wird die Längsregelung durch das Einwirken von Störungen erschwert. Insbesondere die meist unbekannte Fahrbahnsteigung, Windeinfluss oder variable Zuladungen wirken sich auf das dynamische Verhalten des Fahrzeugs aus und erfordern eine gegenüber Parameterschwankungen robuste Regelung.

Bei der Realisierung von Geschwindigkeits- und Abstandsreglern müssen die Nichtlinearitäten der Fahrzeuglängsdynamik sowie eventuell einwirkende Störungen berücksichtigt werden. Dies erfordert meist den Einsatz robuster Regelungsstrategien oder die Anpassung der Reglerparameter an den jeweiligen Arbeitspunkt (*gain scheduling*). Ein verbreiteter Ansatz zur Linearisierung der Längsdynamik besteht in der Einführung eines unterlagerten Beschleunigungsreglers (Germann 1997; Godbole und Lygeros 1993). Der Beschleunigungsregler stellt eine Schnittstelle zur Verfügung, die als Eingangsgröße die Soll-Beschleunigung des Fahrzeugs besitzt. Aus der gewünschten Beschleunigung werden unter Berücksichtigung der Nichtlinearitäten des Systems die benötigten Stellsignale für die Aktorik ermittelt. Es ergibt sich eine Kaskadenstruktur, in der die eigentliche Geschwindigkeits- bzw. Abstandsregelung in einem äußeren Regelkreis angeordnet ist. Im Folgenden wird eine Auswahl an Regelungsansätzen zur Fahrzeuglängsführung vorgestellt.

Lineare Regelung Die Methoden der linearen Regelungstheorie gehen von einem linearen Verhalten der Regelstrecke aus. Für solche Regelungssysteme existiert ein theoretisch gut erschlossenes Repertoire an Synthese- und Analyse-Verfahren (Unbehauen

2000a; Föllinger 1992). Neben diversen Entwurfsverfahren im Bildbereich der Laplace-Transformation und Einstellregeln für die stark verbreiteten PID-Regler stehen Methoden zur Optimierung eines quadratischen Gütekriteriums zur Verfügung (*Linear Quadratic Regulator*, LQR), auch unter Einfluss von Störuschen (*Linear Quadratic Gaussian*, LQG). Der Entwurf der optimalen Regler findet dabei im Zeitbereich unter Zuhilfenahme einer Zustandsraumdarstellung statt. Ein weiteres Zustandsraumverfahren ist die direkte Vorgabe der Pole des geschlossenen Regelkreises (Unbehauen 2000b). Da die Fahrzeuglängsdynamik starke Nichtlinearitäten aufweist, ist der lineare Reglerentwurf nur für bestimmte Arbeitspunkte zulässig. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit einer Parameteranpassung an den jeweiligen Betriebszustand bzw. den Einsatz eines unterlagerten Beschleunigungsreglers, der die Regelstrecke aus Sicht des Längsreglers linearisiert. Hartwich (1974) entwirft einen Kaskadenregler mittels des Wurzelortskurvenverfahrens anhand eines linearen Streckenmodells. Die Parameter des Modells werden dabei in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit angepasst. Tan und Kanellakopoulos (2000) stellen eine Längsregelung für schwere Nutzfahrzeuge vor. Darin wird als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen ein PID-Regler mit festen Verstärkungen entworfen. Naab (1999) generiert eine Soll-Beschleunigung durch die Gewichtung des Abstandsfehlers und der Relativgeschwindigkeit bezüglich eines Vorderfahrzeugs, wodurch sich eine PD-Regelung ergibt. Eine Adaption an unterschiedliche Verkehrssituationen wird über die Anpassung der beiden Gewichte erzielt. Störeinflüsse wie die Fahrbahnsteigung, Windeinfluss oder Eigenschaften des Antriebsstranges bei geringen Geschwindigkeiten werden in einem gesonderten Term erfasst und kompensiert.

Fuzzy-Regelung Die grundlegende Idee der Fuzzy-Regelung ist die sprachliche Beschreibung des gewünschten Verhaltens in Form von „Wenn-Dann“-Regeln. Die für diese Regelbasis benutzten Attribute wie beispielsweise „schnell/langsam“ oder „klein/mittel/groß“ stellen unscharfe Variablen dar. Die scharfen Eingangsgrößen des Fuzzy-Reglers werden über Zugehörigkeitsfunktionen auf die linguistischen Variablen abgebildet (Fuzzifizierung). Die Regelbasis wird anschließend anhand der zuvor bestimmten Zugehörigkeiten ausgewertet (unscharfes Schließen, Inferenz). Aus der so erhaltenen unscharfen Menge wird eine scharfe Stellgröße berechnet (Defuzzifizierung). Anwendungen zur Geschwindigkeits- und Abstandsregelung finden sich beispielsweise bei Takayama und Hirako (1991). Es wird ein Geschwindigkeitsregler vorgestellt, dessen Regelbasis aus dem Geschwindigkeitsfehler und der Änderung des Geschwindigkeitsfehlers eine Änderung des Drosselklappenwinkels generiert. Die Abstandsregelung erfolgt mittels eines übergeordneten Fuzzy-Reglers, der als Stellgröße eine Soll-Geschwindigkeit an den unterlagerten Geschwindigkeitsregler übergibt. Im Gegensatz dazu beschreibt Germann (1997) einen Fuzzy-Abstandsregler, der als Stellgröße eine Soll-Beschleunigung liefert, die durch einen unterlagerten Beschleunigungsregler in Stellsignale für Antrieb und Bremse umgesetzt wird.

Neuronale Netze Stehen Daten über das gewünschte Ein-/Ausgangsverhalten zur Verfügung, lässt sich dieses Verhalten durch ein neuronales Netz approximieren. Ein Netz besteht aus einfachen, nichtlinearen Verarbeitungseinheiten (Neuronen), die miteinander verbunden sind. Anhand der Daten wird ein bestimmtes Verhalten trainiert. Dies geschieht meist über die Veränderung der Gewichte, mit denen Signale zwischen den Neuronen ausgetauscht werden. Im Rahmen der Abstandsregelung dienen üblicherweise der Abstand, die Relativ- und die Absolutgeschwindigkeit als Netzeingabe. Die resultierende Netzausgabe wird mit der gewünschten Ausgabe verglichen und die Gewichte nach einem Lernalgorithmus angepasst. Eine ausführliche Darstellung der Wirkungsweise und möglicher Architekturen neuronaler Netze erfolgt beispielsweise durch Zell (1994). Die automatisierte Abstandsregelung wird von Griswold u. a. (1994) durch ein *Time-Delay*-Netz mit sieben Eingabeneuronen realisiert. Neben der aktuellen Fahrgeschwindigkeit liegen der momentane Abstandsfehler sowie die letzten fünf Werte des Abstandsfehlers an der Eingabeschicht an. Das Netz wurde anhand von menschlichen Fahrbeispielen trainiert und liefert diskrete Werte für eine Soll-Geschwindigkeitsänderung, die an eine unterlagerte Geschwindigkeitsregelung weitergegeben wird. Neben einem *Multilayer-Feedforward-Perceptron*-Netz wird von Fritz (1997) ebenfalls ein partiell rekurrentes Netz mit einer Elman-Netzstruktur eingesetzt. Als Netzeingaben dienen neben dem Abstand und der Relativgeschwindigkeit auch Fahrzeuggrößen wie z. B. die Motordrehzahl und der eingelegte Gang. Das Training erfolgte sowohl modellgestützt als auch anhand von menschlichen Fahrbeispielen und umfasste zusätzlich zu kontinuierlichen Fahrmanövern auch *Stop & Go*-Szenarien.

Sliding-Mode-Regelung *Sliding-Mode*-Regler gehören zur Klasse der strukturvariablen Regler und können robust gegenüber bestimmten Arten von Modellunsicherheiten bzw. Parameterschwankungen entworfen werden. Die Regelung basiert auf der Definition geeigneter Reglerstrukturen und Schaltgesetze, durch die der Systemzustand in den gewünschten Arbeitspunkt überführt wird (Hebisch 1995; Utkin 1981). Im Rahmen des PATH-Programms wurden von Gerdes (1996) *Sliding-Mode*-Regler zur automatischen Längsführung in Fahrzeugkolonnen entworfen. Die Anforderungen an die Regelung umfassten dabei die Geschwindigkeits- und Abstandsregelung sowie das Zusammenfügen und Auftrennen von Konvois. Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurde ein hierarchischer Ansatz gewählt, bei dem auf oberster Ebene *Sliding-Mode*-Regler als Zwischengröße eine Soll-Beschleunigung generieren. Die Umsetzung der Soll-Beschleunigung in einen Bremsdruck bzw. Drosselklappenwinkel erfolgte auf unterlagerter Ebene ebenfalls durch *Sliding-Mode*-Regler, wobei die Nichtlinearitäten der Längsdynamik, insbesondere der Aktorik, kompensiert wurden. In der Arbeit von Gehring (2000) wird ebenfalls eine Regelung von Fahrzeugkolonnen im *Sliding-Mode* beschrieben und durch Experimente mit unterschiedlichen Regelungs- und Abstandsgesetzen verglichen. Fritz (2002) untersuchte die Regelung eines Fahrzeuggespanns bestehend aus zwei Fahrzeugen, bei dem das hintere Fahrzeug dem vorderen automatisch folgt. Neben linearen Referenzreglern wurde ein *Sliding-Mode*-Regler entworfen.

Modellprädiktive Regelung Bei der modellprädiktiven Regelung (MPR, *Model Predictive Control*) wird ein internes Modell der Regelstrecke zur Vorhersage des zukünftigen Systemverhaltens benutzt. Anhand dieses Modells wird ein optimaler Stellgrößenverlauf für einen Prädiktionshorizont bestimmt, der eine gewählte Kostenfunktion minimiert. Mit der modellprädiktiven Regelung ist es möglich, Begrenzungen der Stellgrößen bzw. der Systemzustände in das Optimierungsproblem miteinzubeziehen. Die Berechnung des Stellgrößenverlaufs erfolgt dabei in jedem Zeitschritt, wodurch hohe Rechenlasten entstehen können (Maciejowski 2002). Richert u. a. (2004) und Zambou u. a. (2004) stellen zur automatisierten Längsführung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich und in Stop & Go-Situationen eine modellprädiktive Regelung vor, die auf dem *Generalized-Predictive-Control*-Ansatz (GPC) basiert. Im Rahmen des INVENT-Projekts „Stauassistent“ wird das Regelungskonzept sowohl in Simulationen als auch in Fahrversuchen erprobt. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist die Erkennung der gegenwärtigen Verkehrssituation (Anfahren, Anhalten, Folgen). Abhängig von der Situation wird eine Soll-Geschwindigkeitstrajektorie generiert, die der MPR-Regelung als Sollwertvorgabe dient.

H_∞ -Regelung Bei der H_∞ -Regelung handelt es sich um ein robustes Regelungsverfahren, bei dem Modellunsicherheiten und Parameterschwankungen der Regelstrecke von der Entwurfsmethodik berücksichtigt werden. Neben Stabilitäts- und Güteaussagen bezüglich einer nominellen Strecke können diese Aussagen auf definierte Unsicherheitsbereiche erweitert werden. Ganzelmeier u. a. (2004) beschreiben die Geschwindigkeitsregelung durch einen nichtlinearen H_∞ -Regler, bei dem insbesondere das drehzahlabhängige Antriebsmoment des Motors und variierende Fahrzeugparameter wie die Geschwindigkeit und die Fahrzeugmasse in den Reglerentwurf einfließen. Die auf diese Weise erhaltene Regelung erzielt eine konstante Regelgüte über den gesamten Geschwindigkeits- und Drehzahlbereich des eingelegten Gangs.

2.3 Querführung

Im Folgenden wird ein Überblick über Systeme gegeben, die dem Fahrer bei der Querführung des Fahrzeugs assistieren. Die Querführungsassistenz kann dabei in unterschiedlichen Unterstützungsgraden erfolgen. Droht das Fahrzeug den Fahrstreifen unbeabsichtigt zu verlassen, kann der Fahrer gewarnt werden bzw. durch gezielte Lenkeingriffe bei der Korrektur der Fahrzeugquerbewegung unterstützt werden. Die in diesem Abschnitt betrachteten Querführungssysteme greifen nicht nur in kritischen Situationen in die Lenkung ein, sondern führen das Fahrzeug kontinuierlich entlang des Fahrbahnverlaufs.

Abschnitt 2.3.1 stellt Möglichkeiten für einen aktiven Lenkungseingriff und zur Erfassung der Fahrsituation in Querrichtung sowie zur Erkennung des Fahrstreifenverlaufs vor.

Anschließend wird in Abschnitt 2.3.2 ein Überblick über regelungstechnische Ansätze zur Fahrzeugquerführung gegeben.

2.3.1 Aktorik und Sensorik für die Querverführung

Aktorik In einem Großteil der betrachteten Arbeiten wird die Querverführung mittels eines Lenkaktors umgesetzt, der den Lenkeinschlagwinkel der Vorderräder beeinflusst und zu einer Fahrzeugquerbewegung führt. Diese Beeinflussung kann durch Eingriffe an unterschiedlichen Stellen in der Lenkanlage erfolgen. Die von Darenberg (1987) vorgestellte Aktorik greift zur Beeinflussung der Querdynamik über hydraulische Stellglieder an den Lenkhebeln ein. Üblicherweise erfolgt der Lenkeingriff jedoch durch Elektromotoren, die in die Lenksäule integriert oder mit dieser verbunden sind bzw. direkt die Spurstangen antreiben. Je nach Auslegung des Motors ergibt sich als Stellgröße eine Lenkwinkelgeschwindigkeit bzw. ein Lenkmoment (Drenckhahn 2006). Söhnitz (2001) beschreibt die Montage eines Fahrroboters an Stelle des Fahrersitzes. Der Fahrroboter wird mit dem Lenkrad verbunden. Bis auf die Einrüstung des Roboters sind keine weiteren Modifikationen des Fahrzeugs notwendig. Neben den aufgeführten Möglichkeiten existieren Lenkkonzepte wie *drive-by-wire*¹⁸, Überlagerungslenkungen mittels eines Additionsgetriebes oder das gezielte Abbremsen/Antreiben einzelner Räder (*torque vectoring*). Allerdings sind diese Konzepte für die automatisierte Querverführung im Straßenverkehr nicht uneingeschränkt geeignet.

Sensorik Die Mindestanforderung an eine Sensorik für die automatisierte Querverführung ist die Erkennung des Abstands zur Mittellinie des Fahrstreifens bzw. zu den seitlichen Begrenzungen des befahrbaren Bereichs. Darüberhinaus können Informationen über die Ausrichtung des Fahrzeugs im Fahrstreifen die Regelgüte verbessern. Grundsätzlich kann zwischen Sensoren mit und ohne Vorausschau unterschieden werden. Sensoren mit Vorausschau liefern Daten über den zukünftigen Fahrbahnverlauf, z. B. der Fahrbahnkrümmung. Hierzu werden meist Kamerasysteme eingesetzt, die anhand der Fahrbahnmarkierungen außer dem momentanen Querversatz und Gierwinkel auch Informationen über die Breite und Krümmung des Fahrstreifens zur Verfügung stellen. Bei Stereo-Kamerasystemen können befahrbare Bereiche außerdem über Höhendaten bestimmt werden, die sich aus der Verarbeitung räumlich versetzt aufgenommener Videobilder ergeben. Ein ausführlicher Überblick über kamerabasierte Querverführungssysteme wird von Siedersberger (2003) und Müller (1996) gegeben. Kusunoki (1996) beschreibt den Einsatz eines *Laser-Scanners* zur Querverführung. Der Fahrbahnverlauf wird anhand von reflektierenden Marken am Fahrbahnrand wie z. B. Leitplanken oder Bordsteinen erkannt. Eine Detektion der Fahrbahnmarkierungen ist aufgrund unterschiedlicher Reflektivität gegenüber dem Fahrbelag ebenfalls möglich. Da keine zusätzliche Ausstattung der Infrastruktur benötigt wird, werden die bisher genannten Sensorsysteme auch als fahrzeugautonom bezeichnet. Im Gegensatz dazu gibt es zahlreiche Ansätze zur Positionsbestimmung innerhalb der Fahrbahn, die infrastrukturelle Maßnahmen voraussetzen. Eine Möglichkeit zur Positionsbestimmung besteht in der Verlegung eines mit Wechselspannung beaufschlagten Leitdrahts

¹⁸Bei herkömmlichen Lenkungen besteht eine mechanische Kopplung zwischen der Fahrereingabe (Lenkradwinkel) und dem Lenkwinkel der Vorderräder. Diese Kopplung entfällt bei *drive-by-wire*-Systemen.

auf oder innerhalb der Fahrbahn. Das erzeugte magnetische Feld kann durch Fahrzeugensoren detektiert und zur Lokalisation genutzt werden. Diese Technik kommt bei fahrerlosen Transportsystemen und in Projekten des automatisierten öffentlichen Personenverkehrs zum Einsatz (Jaschke 2002; Götting 2001). Eine ähnliche Vorgehensweise wird im PATH-Projekt verfolgt. Über in die Fahrbahn eingelassene Stabmagnete wird die relative Lage zur Mitte des Fahrstreifens mittels fahrzeugeigener Magnetfeldsensoren gemessen. Über die reine Abstandsinformation hinaus werden Daten über den Fahrbahnverlauf (Krümmung, Auf- und Abfahrten) durch wechselnde Nord-Süd-Ausrichtung der Magnete binär kodiert. Dazu werden 25 Magnetmarkierungen zu einer Nachricht zusammengefasst. Mit einem Abstand von ca. 1,20 m zwischen den Markierungen und einer Geschwindigkeit von 100 km/h kann ungefähr einmal pro Sekunde eine Zusatzinformation empfangen werden (Zhang und Shladover 1997). Durch den Einsatz induktiver Transponder anstelle der Stabmagnete kann der Informationsgehalt jeder Markierung von einem Bit¹⁹ auf mehr als 40 Bit erhöht werden (Götting 2001). Söhnitz (2001) beschreibt eine Lokalisierung mittels differenziellem GPS (DGPS) in Kombination mit einer hochgenauen digitalen Karte sowie einer Trägheitsplattform. Die Genauigkeit der GPS-Ortung wird dabei durch Korrekturinformationen von einer stationären Referenzstation im Umfeld des Fahrzeugs verbessert. Die Referenzstation besteht aus einem GPS-Empfänger, dessen Position im Vorfeld exakt bestimmt wurde. Durch Vergleich der exakten mit der über GPS erhaltenen Position ergibt sich ein momentaner Fehler, der per Funk an den DGPS-Empfänger übermittelt wird.

2.3.2 Ansätze zur Regelung der Querdynamik

Die im Folgenden vorgestellten Querregelungssysteme sind für Fahrten mit alltäglichen, deutlich von der Kraftschlussgrenze entfernten Querbeseleunigungen kleiner 4 m/s^2 ausgelegt. In diesem Bereich lässt sich die Querdynamik ausreichend genau durch ein Einspurmodell²⁰ abbilden. Häufig erfolgt eine Linearisierung des Modells, bei der die Fahrgeschwindigkeit als langsam veränderlicher Parameter betrachtet wird. Helbig (2004) zeigt, dass die Parameter Fahrzeugmasse und Sensorposition für die Querregelung im Vergleich zur Geschwindigkeit eine untergeordnete Rolle spielen.

Beim Reglerentwurf ist neben der Fahrzeugdynamik ebenso die Dynamik des Lenkaktors zu beachten. Abhängig von der Art der eingesetzten Aktorik ergeben sich Unterschiede im zeitlichen Verhalten und in der Art der Stellgröße. Auch die Wahl der Sensorik beeinflusst die möglichen Reglerstrukturen. Sensoren, die Informationen über den zukünftigen Fahrbahnverlauf liefern, ermöglichen vorausschauende Regelungen. Als Störgrößen treten hauptsächlich Seitenwindeinflüsse, eine variierende Fahrbahnneigung und Reibwertänderungen der Fahrbahnoberfläche auf.

¹⁹Über die Nord-Süd-Ausrichtung der Magnete

²⁰Die Herleitung eines Einspurmodells wird in Abschnitt 3.3.2 beschrieben.

Impulssteuerung Bei der Impulssteuerung handelt es sich um ein einfaches Verfahren zur Querregelung, das lediglich ein rudimentäres Fahrzeugmodell voraussetzt. Überschreitet die Querabweichung einen Schwellenwert, wird ein Lenkimpuls aufgeschaltet, der das Fahrzeug wieder in Richtung der Fahrstreifenmitte führt. Nach Erreichen der Fahrstreifenmitte wird ein entgegengesetzter Lenkimpuls beaufschlagt, der das Fahrzeug parallel zur Fahrbahn ausrichtet. Die Lenkimpulse werden über einen Soll/Ist-Vergleich der Fahrzeugquerbewegung skaliert (Brüdigam 1994).

Zielpunktverfolgung Wie bei der Impulssteuerung handelt es sich bei der Zielpunktverfolgung (*aim point error model*) um ein heuristisches Verfahren, d. h. die Regelung basiert auf anschaulichen Überlegungen, ohne dass ein tieferes Modellwissen über die Regelstrecke erforderlich ist. Die Zielpunktverfolgung orientiert sich an der vorausschauenden Fahrweise eines menschlichen Fahrers. Es wird ein Referenzpunkt auf der Soll-Spur in gewisser Entfernung zum Fahrzeug mitgeführt. Der Fehler zwischen der momentanen Ausrichtung des Fahrzeugs und der benötigten Ausrichtung zum Erreichen des Zielpunktes dient als Regelgröße und liefert einen einzustellenden Lenkwinkel. Der Einsatz dieses Verfahrens wird beispielsweise von Broggi u. a. (1999b) und Tsugawa (1997) beschrieben. Die Tendenz enge Kurven zu schneiden, wird von Buld und Krüger (2002) durch eine krümmungsabhängige Adaption der Vorausschauweite verringert.

Fuzzy-Regelung Ebenfalls ein heuristisches Verfahren ist die Fuzzy-Querregelung. Eine Fuzzy-Regelung, deren Regelsätze eine Rückkopplungs-, Vorausschau- und *Gain-Scheduling*-Dimension aufweisen, wird von Hessburg u. a. (1994) vorgestellt. Die Regeln für die Rückkopplung orientieren sich an der Struktur eines PID-Reglers, d. h. als Eingangsgrößen dienen der Ablagefehler von der Fahrstreifenmitte, die Fehleränderung und der integrierte Ablagefehler. Die Vorausschau beinhaltet Regeln, die abhängig von der Krümmung des vorausliegenden Streckenabschnitts einen konstanten Lenkwinkel einstellen. Durch den *Gain-Scheduling*-Anteil wird eine Anpassung an die Fahrzeuggeschwindigkeit vorgenommen. Die Erstellung der Regelsätze erfolgte manuell anhand von Fahrversuchen. Hessburg (1994) optimiert dieselbe Reglerstruktur mittels genetischer Algorithmen. Dazu wird eine Gütefunktion (*fitness*) für das Reglerverhalten definiert. Aus einer Anfangspopulation unterschiedlicher Reglerauslegungen werden Varianten mit einer hohen Güte selektiert und bilden durch Mutation – also einer leichten Veränderung der Parameter – eine neue Generation an Reglern, aus der wiederum die besten Reglervarianten ausgewählt werden. Dieser Zyklus wiederholt sich, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist (Anzahl der Generationen, Erreichung eines Güteschwellwerts).

Neuronale Netze Die von Pomerleau (1993) realisierte automatisierte Querführung basiert auf einem *Multilayer-Feedforward-Perceptron*-Netz und wurde in Fahrversuchen bis zu einer Geschwindigkeit von 24 m/s erprobt. Das Training des Netzes erfolgte anhand realer Verkehrsszenarien. Fritz (1997) untersuchte ebenfalls *Multilayer-Perceptron*-Netze,

die sowohl mit realen Fahrszenarien als auch modellbasiert trainiert wurden. Für das modellbasierte Training wurden Krümmungs-, Geschwindigkeits- und Soll-Ablageprofile vorgegeben. Die Fahrzeugdynamik wurde durch ein nichtlineares Einspurmodell angenähert. Bei Höchstgeschwindigkeiten von ca. 28 m/s wurden maximale Abweichungen von 30 cm erzielt. Dabei konnte das Verhalten bei Störungen, beispielsweise bei geneigter Fahrbahn, durch die Einführung eines parallel betriebenen Korrekturernetzes verbessert werden.

PID-Regler Bei der Proportional-Integral-Differenzial-Regelung (PID) wird die Reglerausgangsgröße aus der gewichteten Addition des Regelfehlers, des Fehlerintegrals und der Fehleränderungsgeschwindigkeit gebildet. Da ein idealer PID-Regler physikalisch nicht realisierbar ist bzw. Rauschen, das in realen Messsystemen zwangsläufig auftritt, durch die Differentiation in unzulässiger Weise verstärkt wird (Föllinger 1992), wird der D-Anteil häufig durch ein Differenzial-Glied mit Verzögerung ersetzt (DT_n). Eine sehr frühe Implementierung eines PID-Reglers zur Querführung entlang eines Leitkabels wird von Fenton u. a. (1976) beschrieben. Zur Erhöhung der Dämpfung wurde ein Filter zweiter Ordnung dem Regelkreis hinzugefügt. Peng u. a. (1992) setzten eine PID-Regelung mit geschwindigkeitsabhängiger Parametrierung und einer parallel geschalteten Krümmungsvorsteuerung ein. Košecká u. a. (1998) untersuchten unter anderem einen PIDT₂-Regler, bei dem eine Kompensation der Fahrbahnkrümmung durch Addition eines stationären Lenkwinkels erfolgt. Guldner (1999) implementierte einen PDT₁- bzw. PIDT₁-Regler für ein Querführungssystem ohne Vorausschau. Die schlechte Dämpfung der Querdynamik, insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten, wurde durch die Einführung einer virtuellen Vorausschau verbessert. Dies erforderte allerdings eine Messung des Gierwinkels. Basierend auf diesen Untersuchungen entwarfen Tan u. a. (2002) einen PIDT₂-Regler zur Ausregelung der Querabweichung sowie einen PDT₂-Regler zur Ausregelung des Gierwinkels. Die Reglerparameter wurden geschwindigkeitsabhängig über *Gain-Scheduling*-Terme angepasst.

Zustandsregelung Zapp (1988) beschreibt eine Regelung der Querdynamik mittels eines linearen Zustandsreglers. Die Verstärkungen der rückgeführten Zustandsgrößen wurden dabei abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit angepasst. Dazu wurden die Reglerparameter für äquidistant im relevanten Geschwindigkeitsbereich verteilte Arbeitspunkte durch Polvorgabe bestimmt. Ebenfalls durch Polvorgabe wurde von Guldner u. a. (1997) eine Zustandsregelung entworfen, bei der als Messgrößen der Querversatz an der vorderen und hinteren Stoßstange zur Verfügung standen. Ausgehend von diesem Regler wurden Modifikationen vorgenommen, durch die eine robuste Regelung bei hohen Geschwindigkeiten erzielt werden konnte. Neben der Impulssteuerung hat Brüdigam (1994) eine Zustandsregelung untersucht, die auf einem linearen Einspurmodell fünfter Ordnung basiert und mit dem Polvorgabeverfahren ausgelegt wurde. Die Lage von drei der insgesamt fünf Pole war dabei geschwindigkeitsabhängig. Der Einsatz dieses Reglers für hohe Geschwindigkeiten bis 50 m/s bei maximalen Querabweichungen von 40 cm wird von Maurer (2000) beschrieben. Im Gegensatz zu den auf Autobahnszenarien ausgelegten Regelungen werden von Söhnitz (2001) Regelungsansätze beschrieben, die im Rahmen

des niedersächsischen Projekts „Autonomes Fahren“ die Anforderungen für eine autonome Durchführung von Dauerlauffahrten auf schmalen, unebenen Schlechtwegestrecken mit kleinen Kurvenradien erfüllen sollten. Unter anderem wurde ein H_2 -optimaler Regler entworfen, dessen Parameter in Schritten von 1 m/s für den Geschwindigkeitsbereich von 0-17 m/s bestimmt wurden. Die H_2 -Regelung ist eng mit der LQG-Regelung verwandt, mit dem Unterschied, dass keine quadratische Kostenfunktion, sondern deren Wurzel optimiert wird. Diese 2-Norm-Optimierung bietet die Möglichkeit einer frequenzabhängigen Wichtung des Reglerverhaltens. Manigel (1993) beschreibt ebenfalls den Entwurf eines H_2 -Reglers mit geschwindigkeitsabhängiger Anpassung der Reglerparameter. Der Einsatz eines FSLQ-Reglers (*Frequency-Shaped Linear Quadratic*) und dessen Vorteile gegenüber einem PID-Regler werden von Peng u. a. (1992) dargestellt. Das Regelungsprinzip basiert auf der Einführung eines integralen Gütefunktions, bei dem der Ablagefehler, der Fahrkomfort²¹ und die Robustheit gegenüber nicht modellierten Einflüssen frequenzabhängig gewichtet wird. Durch die Transformation auf erweiterte Zustandsgrößen lässt sich die Optimierung des Gütefunktions auf die Lösung einer algebraischen Riccati-Gleichung zurückführen, also auf eine LQG-Regelung.

Exakte Ein-/Ausgangslinearisierung Die Linearisierung nichtlinearer Systeme erfolgt meist durch eine Taylor-Reihenentwicklung, bei der Terme höherer Ordnung vernachlässigt werden. Das auf diese Weise erhaltene Modell besitzt Gültigkeit in einer Umgebung um den Arbeitspunkt, um den linearisiert wurde. Im Gegensatz dazu wird bei der exakten E/A-Linearisierung das System durch die Einführung einer nichtlinearen Koordinatentransformation und eines nichtlinearen Rückführgesetzes in ein System mit einer vorgegebenen linearen Dynamik umgewandelt. Die Regelung dieses exakt linearisierten Systems kann durch einen linearen Regler erfolgen, zu dessen Entwurf die Methoden der linearen Regelungstheorie zur Verfügung stehen (Allgöwer 1996; Allgöwer und Gilles 1995; Isidori 1995). Söhnitz (2001) setzt eine Querregelung mittels exakter E/A-Linearisierung um. Ausgehend von einem nichtlinearen Einspurmodell wird ein passendes Rückführgesetz bestimmt, durch das die Nichtlinearitäten der Querdynamik kompensiert werden. Das so linearisierte System weist das Verhalten einer Integratorkette auf, dem das gewünschte Gesamtverhalten durch eine Zustandsrückführung aufgeprägt wird. Der Entwurf der Zustandsregelung erfolgt nach dem LQG-Verfahren. Košecká u. a. (1998) beschreiben die Entkopplung von Längsgeschwindigkeit und Querdynamik mittels der E/A-Linearisierung. Als übergeordneter linearer Regler wird ein PIDT₂-Regler eingesetzt.

Sliding-Mode-Regelung *Sliding-Mode*-Querregler können aufgrund ihrer Strukturvariabilität robust gegenüber Nichtlinearitäten der Fahrzeugdynamik, Modellunsicherheiten und Störeinflüssen ausgelegt werden. Beispielsweise entfällt bei dem von Hingwe und Tomizuka (1997) untersuchten *Sliding-Mode*-Regler die bei linearen Reglern übliche geschwindigkeitsabhängige Parameteranpassung. Neben den positiven Robustheitseigenschaften

²¹ Der Fahrkomfort bezieht sich hier auf eine Abweichung der Querbeschleunigung von einem gewünschten Wert.

bewirkt das zugrundeliegende schaltende Regelgesetz ein hochfrequentes Umschalten der Stellgröße. Dieses „Rattern“ wird von Pham u. a. (1994) bzw. Tai und Tomizuka (2003) durch ein Grenzschnittkonzept gemindert, durch das jedoch die Regelgenauigkeit beeinträchtigt wird. Ein alternativer Ansatz, der auf dem Übergang von einer Lenkwinkel- zu einer Lenkwinkelgeschwindigkeitsregelung mit anschließender Integration basiert, wird von Ackermann u. a. (1995) theoretisch untersucht. Durch die Integration wird das Stellsignal gefiltert, ohne die Regelgenauigkeit zu beeinflussen. Die Implementierung dieses Ansatzes in einem Versuchsfahrzeug wird von Hingwe und Tomizuka (1995) bzw. Hingwe und Tomizuka (1997) beschrieben. Gehring (2000) entwarf unter anderem einen *Sliding-Mode*-Regler zur Querführung von Fahrzeugkolonnen. Die Querregelung erfolgte nach dem Prinzip der elektronischen Deichsel. Bei dieser Herangehensweise kann es zur Verstärkung von Störungen entlang der Kolonne kommen, so dass Untersuchungen der Kolonnenstabilität in Querrichtung durchgeführt wurden.

QFT-Synthese Die *Quantitative Feedback Theory* (QFT) basiert auf der Weiterentwicklung der Frequenzbereichsverfahren von Bode (Horowitz und Sidi 1972; Horowitz 1963). Im Zeitbereich gestellte Anforderungen werden dazu in den Frequenzbereich transformiert und mit Hilfe von Nichols-Diagrammen als Beschränkungen für das Übertragungsverhalten des geschlossenen Kreises grafisch dargestellt. Der Entwurfsprozess gestaltet sich durch den Einsatz der Nichols-Diagramme sehr anschaulich und ermöglicht die Einbeziehung von Unsicherheiten bei der Modellierung der Regelstrecke, so dass Regelungen mit robuster Stabilität und Regelgüte entworfen werden können. Die Anwendung der QFT-Synthese auf die Querführung eines PKW wird von Helbig (2004) dargestellt. Unter der Annahme einer vollständigen Kompensation der Fahrbahnkrümmung wurden Fahrten entlang einer mit Magneten markierten geraden Teststrecke durchgeführt. Als Störungen traten neben Seitenwind auch Fahrbahnebenenheiten längs und quer zur Fahrtrichtung sowie Sensorrauschen und variierende Magnetpositionen auf. Der entworfene Regler erzielte eine Spurführungsgenauigkeit von ± 5 cm in einem Geschwindigkeitsbereich von 3-30 m/s. Durch den robusten Reglerentwurf ist eine Anpassung der Reglerparameter an die Fahrgeschwindigkeit nicht notwendig. Zambou (2005) beschreibt den Regelungsentwurf mittels der QFT-Synthese für einen robusten Lenkratenregler, der einem prädiktiven Querregler unterlagert ist.

2.4 Längs- und Querführung

Im folgenden Abschnitt werden Arbeiten vorgestellt, die sich mit der gleichzeitigen Regelung der Längs- und Querbewegung eines Fahrzeugs befassen. Die ganzheitliche Betrachtung der Fahrzeugführung ermöglicht gegenüber den in den Abschnitten 2.2 und 2.3 dargestellten Einzelbetrachtungen die Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei der Längs- und Querregeltätigkeit. Untersuchungen solcher Wechselwirkungen werden beispielsweise von Köppel und Bock (1977) oder Hackenberg und Heiβing (1982) beschrieben. An-

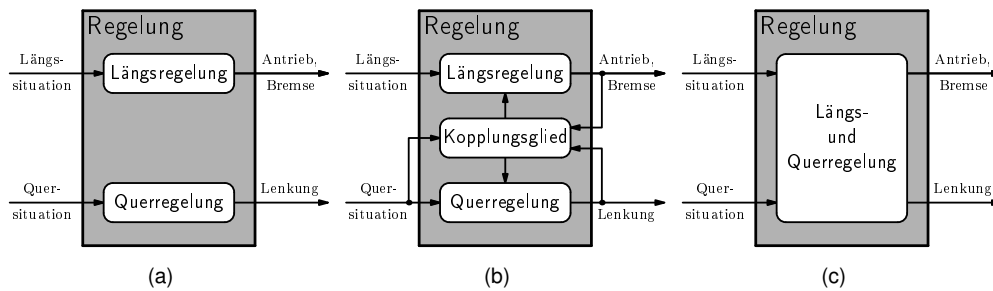


Abbildung 2.1: Regelungsschemata für (a) parallele, (b) kombinierte und (c) integrierte Längs- und Querführungssysteme.

hand von Probandenversuchen wurde sowohl ein Einfluss des Streckenverlaufs auf das Geschwindigkeitsverhalten²² als auch ein Zusammenhang zwischen Längs- und Querbesehleunigungen²³ abhängig von der Fahrgeschwindigkeit²⁴ festgestellt. Apel (1997) beschreibt die Herleitung eines Fahrermodells für die Längs- und Querführung bei Normalfahrten und in kritischen Situationen. Nach diesem Modell beherrscht der Fahrer in alltäglichen Verkehrssituationen die gleichzeitige Regelung der Längs- und Querdynamik, während in kritischen Situationen jede Teilaufgabe für sich den Fahrer soweit beansprucht, dass die Bearbeitung der Längs- und Querführung sequentiell erfolgt.

Neben den bisher genannten Fällen, bei denen die Wechselwirkung zwischen Längs- und Querverhalten durch den Fahrer eingebracht werden, bestehen auch kinematische und kinetische Kopplungen zwischen den beiden Bewegungsrichtungen (Lim 1996). So hat die Geschwindigkeit in Längsrichtung erheblichen Einfluss auf die Querbewegung innerhalb eines Fahrstreifens und wirkt sich ebenfalls auf das querdynamische Verhalten des Fahrzeugs aus. Umgekehrt wirkt sich die Querbewegung bei Kurvenfahrt über den Kurvenwiderstand auf die Längsbewegung aus.

Die gleichzeitige Längs- und Querführung kann in unterschiedlichen Ausprägungen erfolgen. Zur Einordnung der verschiedenen Ansätze aus regelungstechnischer Sicht werden deshalb die Kategorien der parallelen, kombinierten und integrierten Längs- und Querführung vorgeschlagen:

- *Parallele Längs- und Querführung:* Zwei separate Assistenzsysteme unterstützen bei der Fahrzeugführung in Längs- bzw. Querrichtung. Die Systeme werden getrennt voneinander entworfen, ohne dass eine Wechselwirkung zwischen den Systemen vorgesehen ist (vgl. Abbildung 2.1(a)).
- *Kombinierte Längs- und Querführung:* Es werden ebenfalls zwei Systeme getrennt voneinander entworfen, allerdings werden Kopplungen zwischen der Längs- und

²²Die Kurvigkeit der Straße ist ein entscheidender Einflussfaktor für die Geschwindigkeitswahl.

²³Bei hohen Querbesehleunigungen werden nur geringe Längsbesehleunigungen eingestellt.

²⁴Bei hohen Geschwindigkeiten werden nur geringe Querbesehleunigungen eingestellt.

Querregelung explizit berücksichtigt (vgl. Abbildung 2.1(b)). So kann z.B. die Erkennung einer stark gekrümmten Fahrbahn über ein Koppelglied zur Reduktion der Wunschgeschwindigkeit führen.

- **Integrierte Längs- und Querführung:** Als integrierter Ansatz soll eine Regelung bezeichnet werden, wenn eine Kopplung zwischen Längs- und Querregelung implizit enthalten ist. Es erfolgt also ein Übergang von zwei Eingrößenregelungen zu einer Mehrgrößenregelung (vgl. Abbildung 2.1(c)).

Neben der regelungstechnischen Umsetzung einer gleichzeitigen Längs- und Querführung werden ebenfalls Bedienkonzepte zur Aktivierung und Überwachung der Führungsfunktionen benötigt, auf die im Folgenden nicht näher eingegangen wird. Ansätze finden sich beispielsweise in den Arbeiten von Weilkes u. a. (2005) und Drenckhahn (2006).

Parallele Längs- und Querführung Die von Fritz (1997) entworfenen neuronalen Geschwindigkeits-, Abstands- und Querregler werden in einem Versuchsfahrzeug parallel betrieben, d. h. Wechselwirkungen zwischen der Längsführung und der Querführung werden nicht behandelt. Gehring (2000) löst die Problemstellung der Längs- und Querführung für dichte Fahrzeugkolonnen ebenfalls separat voneinander, indem sowohl lineare Zustandsregler als auch *Sliding-Mode*-Regler jeweils für die Längs- und Querregelung zum Einsatz kommen. Die Aufgabe der Längs- und Querführung von Fahrzeugkolonnen wird in der Arbeit von Zambou (2005) durch zwei Regelungssysteme gleicher Struktur erfüllt. In einem mittels der QFT-Synthese entworfenen unterlagerten Regelkreis werden die Aktoren in Längs- bzw. Querrichtung angesteuert. Die Vorgabe der Soll-Größen zur Abstands- bzw. Ablageregelung erfolgt anhand modellprädiktiver Ansätze.

Kombinierte Längs- und Querführung Khatir und Davison (2006) beschreiben den Einsatz zweier PID-Regler für die Fahrzeugregelung in Konvois. Die Fehler, die den Reglern für die Längs- und Querbewegung als Eingangssignale dienen, ergeben sich aus der gewichteten Kombination des Abstandsfehlers und des Winkelfehlers bezüglich des Vorderfahrzeugs. Eine kombinierte Längs- und Querführung bei Fahrstreifenwechselmanövern wird von Kölbl und Zahn (2006) vorgestellt. Zusammen mit einer umfangreichen Umfeldsensorik, die in der Lage ist, Fahrzeuge auf dem Nachbarfahrstreifen zu detektieren, werden die drei Assistenzsysteme ACC, HC und Spurwechselwarnung kombiniert. Der Soll-Abstand der ACC-Regelung zum Vorderfahrzeug des Ausgangsfahrstreifens wird dabei von der Querführung in Abhängigkeit von der Querposition verringert. Lim (1996) beschreibt eine kombinierte Längs- und Querregelung von dichten Fahrzeugkolonnen. Aufbauend auf einer unterlagerten Momentenregelung zur Längsführung bzw. einer Lenkwinkelregelung zur Querführung werden *Sliding-Mode*-Schaltflächen anhand von Ljapunov-Funktionen ausgelegt, um Fehler in der Querposition und im Abstand zum Vorderfahrzeug auszuregulieren. Nach Analyse der bestehenden Kopplungen zwischen der Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs werden der Regelung kompensatorische Kopplungsglieder hinzugefügt.

Integrierte Längs- und Querführung Drenckhahn (2006) untersucht das Verfahren der Modellfolgeregelung (vgl. Roppenecker 1994) zur Längs- und Querführung, durch das ein getrennter Entwurf des Führungs- und Störverhaltens ermöglicht wird. Dazu erfolgt zunächst eine modellbasierte Trajektoriengenerierung. Störungen und Modellfehler werden anschließend durch eine Folgeregelung ausgeregelt. Um die Regelung weitestgehend unabhängig vom eingesetzten Fahrzeugtyp zu machen, wird das Modell zur Trajektoriengenerierung auf die kinematischen Zusammenhänge der Fahrzeugbewegung reduziert. Die Anpassung an die Fahrzeugdynamik ist dadurch auf die Auslegung der Folgeregelung beschränkt. Die Kopplung zwischen der Längs- und Querbewegung wird durch eine gemeinsame Trajektoriengenerierung und eine gemeinsame Folgeregelung berücksichtigt. Die Arbeit von Rodić und Vukobratović (2002) setzt sich mit der Fahrzeugführung unter Berücksichtigung der Kopplungen zwischen den Hauptbewegungsrichtungen auseinander. Dabei wurden zwei Module mit ausgeprägten wechselseitigen Kopplungen identifiziert: Die Längs-, Quer- und Gierbewegung einerseits, das Nicken, Wanken und der Fahrzeughub andererseits. Der entworfene zentrale Regelungsansatz besitzt eine hierarchische Struktur, die zunächst eine Bestimmung generalisierter Kräfte vorsieht. Der Einfluss dieser Kräfte soll den Fahrzeugschwerpunkt entlang einer vorgegebenen Trajektorie führen. Die Umsetzung in Stellsignale für die Fahrzeugaktorik erfolgt anschließend auf einer unterlagerten Ebene. Es kommen teilweise mehrdimensionale PD- bzw. PID-Regler zum Einsatz. Modellfehler und nicht modellierte Nichtlinearitäten werden durch einen neuronalen Regler kompensiert. Eine Evaluation und Stabilitätsuntersuchungen der entworfenen Regelung werden anhand von Simulationen durchgeführt.

Kapitel 3

Modellierung

Der Beginn aller Wissenschaften
ist das Erstaunen, dass die
Dinge sind, wie sie sind.

(Aristoteles, 384-322 v. Chr.)

Dieses Kapitel befasst sich mit mathematischer Modellierung der Bewegung des Versuchsfahrzeugs. Ziel der Modellierung ist die hinreichend genaue Beschreibung des realen Fahrverhaltens im Arbeitsbereich des zu entwerfenden Fahrerassistenzsystems. Die hergeleiteten Modelle werden in Kapitel 4 zur Überprüfung und Veranschaulichung der entworfenen Regelungssysteme benutzt. Die betrachteten Verkehrssituationen beschränken sich auf Fahrten auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen, wobei die auftretenden Beschleunigungen im Bereich alltäglicher Fahrsituationen angenommen werden. Untersuchungen hierzu wurden von Hackenberg und Heißing (1982) anhand von Probandenversuchen durchgeführt. Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die von den Probanden umgesetzten Beschleunigungen in Quer- und Längsrichtung. Es sind sowohl die maximal auftretenden Beschleunigungen als auch 95%-Bereiche eingezeichnet. Wie in Abbildung 3.1(a) dargestellt, sind die von den Fahrern eingestellten Querbeschleunigungen abhängig von der momentanen Geschwindigkeit in Längsrichtung. Die auftretenden Längsbeschleunigungen werden durch den Lenkwinkel beeinflusst (vgl. Abbildung 3.1(b)). Als relevanter Arbeitsbereich für die Modellbildung werden die 95%-Bereiche betrachtet. Demnach sind die Querbeschleunigungen für den gesamten Geschwindigkeitsbereich betragsmäßig kleiner als 4 m/s^2 . Die auftretenden Längsbeschleunigungen befinden sich zwischen $-2,5 \text{ m/s}^2$ und 1 m/s^2 . Für diesen Arbeitsbereich wird im Folgenden ein Fahrzeugmodell hergeleitet, das in späteren Kapiteln zur simulationsgestützten Parametrierung sowie für eine simulative Validierung der Fahrzeugregelung benutzt wird.

Abschnitt 3.1 beschreibt die in dieser Arbeit angewandte Methodik zur Systemmodellierung. Anhand der Reaktion auf eingekoppelte Eingangsanregungen wird auf das dynamische Verhalten des Fahrzeugs geschlossen.

In Abschnitt 3.2 wird ein Modell der Fahrzeuglängsdynamik durch die Auswertung von Sprungantworten hergeleitet. Neben der Identifikation der Systemdynamik erfolgt eine Abschätzung des maximalen Beschleunigungsvermögens. Das modellierte Übertragungsver-

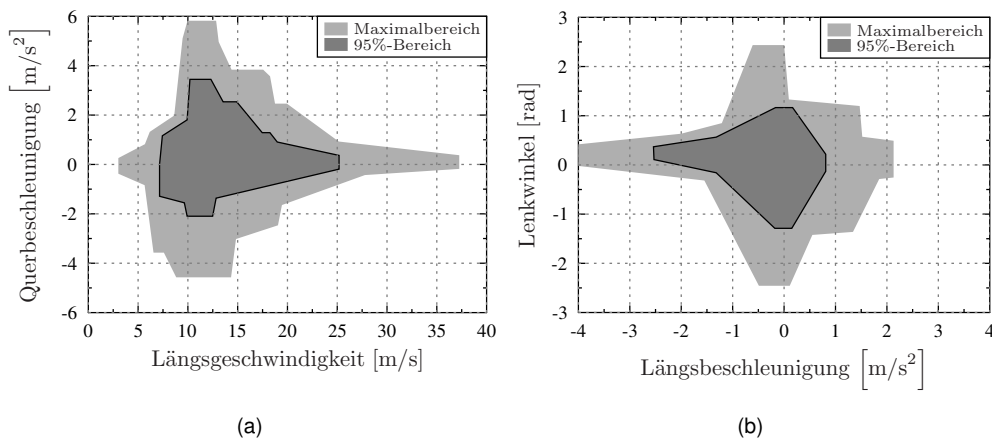


Abbildung 3.1: Ergebnisse einer Probandenstudie über auftretende Beschleunigungen in unterschiedlichen Fahrsituationen: (a) Querbeschleunigung in Abhängigkeit von der Längsgeschwindigkeit, (b) Längsbeschleunigung in Abhängigkeit vom Lenkwinkel (Hackenberg und Heißing 1982).

halten wird mit dem realen Verhalten mittels zufällig aufgeschalteter Stellsignale verglichen.

In Abschnitt 3.3 wird ein Modell für die Querbewegung des Versuchsfahrzeugs bestimmt. Dazu wird die Dynamik der Lenkaktorik anhand von Sprungantworten approximiert. Die aus dem Lenkeingriff resultierende Fahrzeugbewegung wird anschließend durch ein Einspurmodell beschrieben. Dabei werden die an den Vorderrädern angreifenden Rückstellmomente bei der Modellbildung berücksichtigt. Eine Validierung dieses Modells erfolgt wiederum durch das Einkoppeln zufälliger Stellgrößen und den Vergleich mit realen Testfahrten.

Die Teilmodelle der Längs- und Querbewegung werden in Abschnitt 3.4 zu einem gekoppelten Modell zusammengefasst. Dazu werden die wesentlichen Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen modelliert.

3.1 Ansatz zur Systemmodellierung

Um zu einer mathematischen Beschreibung der Fahrzeugbewegung zu gelangen, existieren zwei prinzipielle Ansätze. Sind die Eigenschaften der Systemkomponenten sowie deren Wechselwirkung untereinander bekannt, lässt sich ein Modell theoretisch herleiten. Besteht kein vollständiger Einblick in die innere Struktur des Systems oder weist das System eine hohe Komplexität auf, kann durch Einkopplung eines Testsignals das dynamische Verhalten anhand der Systemantwort experimentell bestimmt werden.

In dieser Arbeit wird der experimentelle Ansatz verfolgt. Dazu wird zunächst eine Modellstruktur angenommen. Die Parameter des Modells werden anhand von Versuchsfahrten, bei denen das Fahrzeug auf geeignete Weise angeregt wird, bestimmt. Die gemessene Fahrzeugreaktion mit dem Ziel einer Modellbildung ausgewertet. Üblicherweise umfasst dieses Vorgehen vier wesentliche Schritte (Unbehauen 2000a; Föllinger 1992).

1. *Festlegung eines Testsignals:* Das Testsignal zur Erregung der Eingangsgröße des Systems sollte das System im gesamten relevanten Frequenzbereich hinreichend anregen. Die Dauer der Anregung wird üblicherweise durch das Erreichen eines neuen stationären Zustands des Systemausgangs bestimmt.
2. *Wahl eines Modellansatzes:* Anhand des qualitativen Verlaufs der gemessenen Systemantwort und unter Berücksichtigung eventueller A-priori-Kenntnisse wird eine Modellstruktur gewählt, mit der das reale Verhalten angenähert werden soll. Zweckmäßigerweise wird eine möglichst einfache Struktur gewählt, jedoch muss der Modellansatz ausreichend komplex sein, um die zu modellierende Dynamik nachbilden zu können.
3. *Festlegung eines Gütekriteriums:* Im vorherigen Schritt wurde die Struktur des Modells vorgegeben, die Modellparameter sind jedoch noch unbestimmt. Um unterschiedliche Parametrierungen vergleichen zu können, erfolgt eine Bewertung der jeweiligen Auslegung mittels eines Gütekriteriums. Häufig erfolgt die Bestimmung der Modellgüte anhand der quadrierten Abweichung zwischen dem realen Systemverhalten und dem Modellverhalten unter dem Einfluss identischer Eingangssignale.
4. *Wahl eines Optimierungsverfahrens:* Wird ein minimaler Modellfehler gefordert, lässt sich mit der zuvor festgelegten Modellstruktur und dem gewählten Gütekriterium eine Optimierungsaufgabe formulieren. Zu dessen Lösung wird ein numerisches Verfahren gewählt, das als Ergebnis ein Modell mit einer hinsichtlich des Gütekriteriums optimalen Parametrierung liefert.

Ein Überblick über das beschriebene Vorgehen zur experimentellen Modellbildung im Hinblick auf die vorliegende Arbeit ist in Abbildung 3.2 gegeben. Die als bekannt vorausgesetzte Eingangsgröße $u(t)$ dient als Erregung sowohl für das reale System mit der Ausgangsgröße $y(t)$ wie auch für den Modellansatz mit der Ausgangsgröße $\hat{y}(t)$ und einer Parametrierung \mathbf{P} . Die Differenz zwischen den Ausgangssignalen wird als Modellfehler

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$$

festgelegt. Mit der Festlegung des integrierten quadratischen Fehlers als Gütefunktional kann die Optimierungsaufgabe

$$\min_{\mathbf{P}} J = \frac{1}{T} \int_0^T (e(t))^2 dt$$

gestellt werden. Die Berechnung des optimalen Parametervektors erfolgt iterativ nach der Methode der kleinsten Quadrate. Als Implementierung der Identifikationsalgorithmen wurde die für das Software-Paket MATLAB[®] erhältliche *System Identification Toolbox*TM (Ljung 2008) verwendet.

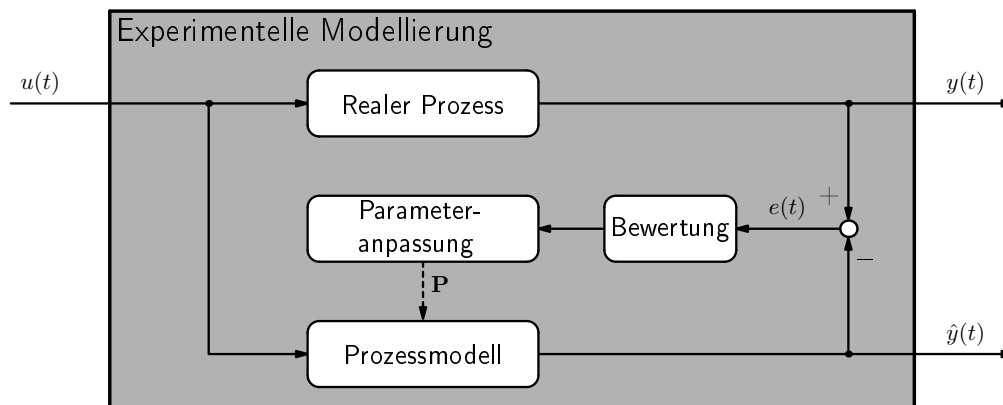


Abbildung 3.2: Prinzip der Modellierung nach dem Ausgangsfehlerverfahren.

Das auf die beschriebene Weise hergeleitete Modell wird in dieser Arbeit durch das Aufschalten zufälliger Eingangssignale validiert. Der Fehler zwischen dem realen Systemverhalten und dem modellierten wird subjektiv bewertet.

3.2 Modellierung der Längsbewegung

Zur Beeinflussung der Längsbewegung wird auf die Beschleunigungsschnittstelle eines Serienfahrzeugs mit ACC-System zurückgegriffen. Diese setzt eine vorgegebene Soll-Beschleunigung durch Ansteuerung der Fahrzeugaktuatorik²⁵ in eine Ist-Beschleunigung um. Die Regelung der Längsbeschleunigung erfolgt innerhalb eines unterlagerten Regelkreises.

Wegen der Komplexität der inneren Struktur der unterlagerten Beschleunigungsregelung wird die Dynamik der Regelung sowie der Fahrzeugkomponenten, die das dynamische Verhalten beeinflussen, als *Black Box* betrachtet. Diese ist ausschließlich durch das Übertragungsverhalten der Soll-Beschleunigung zur Ist-Beschleunigung charakterisiert. Zur Abschätzung des Übertragungsverhaltens werden hierzu sprunghafte Änderungen der Soll-Beschleunigung aufgeschaltet. Anhand der gemessenen Sprungantworten werden in Abschnitt 3.2.1 Übertragungsglieder identifiziert, die das beobachtete dynamische Verhalten approximieren.

Die hergeleiteten Übertragungsglieder sind nicht geeignet, Begrenzungen der Beschleunigung realer Fahrzeuge nachzubilden. Um die Längsbewegung realistisch anzunähern, wird deshalb in Abschnitt 3.2.2 neben den dynamischen Eigenschaften ebenfalls das maximale Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs nachgebildet.

²⁵Vgl. Abschnitt 5.1

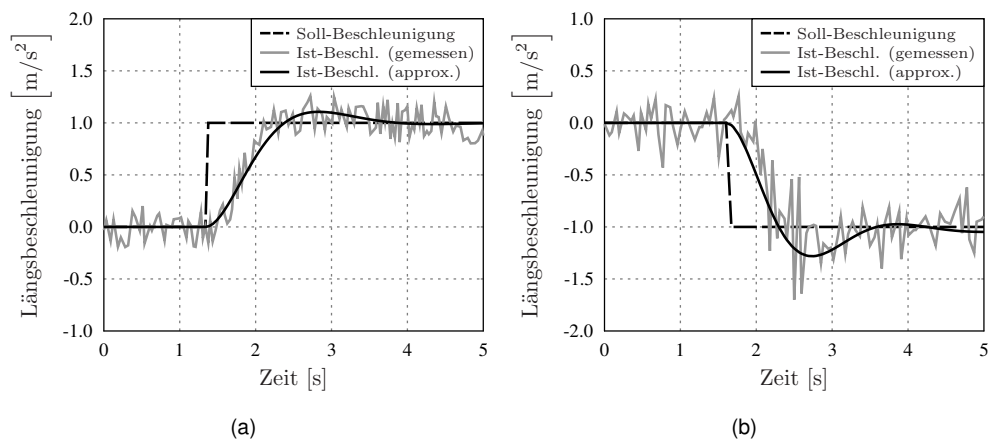


Abbildung 3.3: Identifikation der Dynamik der Längsbeschleunigungsschnittstelle mittels Sprungantworten: (a) Sprungantwort auf einen positiven Sprung der Soll-Größe von 0 m/s^2 auf 1 m/s^2 und (b) auf einen negativen Sprung von 0 m/s^2 auf -1 m/s^2 .

Abschließend wird in Abschnitt 3.2.3 das dynamische Modell mit Begrenzung der maximalen Beschleunigung durch den Vergleich mit einer realen Versuchsfahrt validiert. Dazu wird sowohl dem Modell als auch dem Versuchsfahrzeug ein zufälliger Verlauf der Soll-Beschleunigung vorgegeben und die simulierten mit den realen Ausgangsgrößen verglichen.

3.2.1 Dynamik der Längsbeschleunigung

Bei der Umsetzung von positiven bzw. negativen Beschleunigungsvorgaben kommen unterschiedliche Aktoren zum Einsatz. Bei Fahrten auf ebener Fahrbahn wird im Falle positiver Soll-Beschleunigungen ein Antriebsmoment vom Verbrennungsmotor erzeugt. Über das Getriebe, die Antriebswelle und das Differenzial wird das Moment auf die angetriebenen Räder übertragen. Negative Soll-Beschleunigungen, die über die aus den Fahrwiderständen resultierende Verzögerung hinausgehen, werden über einen Druckaufbau im Bremssystem durch Ansteuerung des serienmäßigen ESP-Systems erreicht.

Da die Aktoren zur Umsetzung der Soll-Beschleunigung unterschiedliche dynamische Eigenschaften besitzen, werden im Folgenden Übertragungsglieder identifiziert, die dem Verhalten bei positiven bzw. negativen Beschleunigungsvorgaben entsprechen. Die Identifikation erfolgt anhand der Auswertung der Systemantworten auf Sprünge der Eingangsgröße. Beispielhaft sind in Abbildung 3.3 die Sprungantworten auf einen positiven Sprung der Soll-Beschleunigung von 0 m/s^2 auf 1 m/s^2 bzw. auf einen negativen Sprung von 0 m/s^2 auf -1 m/s^2 dargestellt. Ebenfalls sind in der Abbildung die simulierten Systemantworten der abgeleiteten Modelle bei identischer Eingangsanregung ersichtlich.

Der qualitative Verlauf der Sprungantworten zeichnet sich durch eine Annäherung der Ist-Beschleunigung an den Vorgabewert aus, bei dem ein durch die unterlagerte Beschleunigungsregelung verursachtes Überschwingen auftritt. Um diese Dynamik abzubilden, werden PT_2 -Glieder für das dynamische Verhalten bei positiver bzw. negativer Soll-Beschleunigung angesetzt. Im Falle positiver Beschleunigungsanforderungen ergibt sich die Übertragungsfunktion

$$G_{\text{längs}}^+(s) = \frac{K_{\text{längs}}^+}{T_{1,\text{längs}}^+ s^2 + T_{2,\text{längs}}^+ s + 1}.$$

Wie in Abbildung 3.3(a) ersichtlich, stimmt der stationäre Endwert der umgesetzten Beschleunigung gut mit dem Vorgabewert überein. Aus diesem Grund wird eine Verstärkung von $K_{\text{längs}}^+ = 1$ angenommen. Da der Motor eine drehzahlabhängige Dynamik aufweist, wurden zur Identifikation der Zeitkonstanten $T_{1,\text{längs}}^+$ und $T_{2,\text{längs}}^+$ Sprünge bei unterschiedlichen Motordrehzahlen sowie mit allen verfügbaren Gängen durchgeführt und ausgewertet. Aus den ermittelten Parametern wurde ein durchschnittliches dynamisches Verhalten mit den Parametern $T_{1,\text{längs}}^+ = 0,23\text{ s}$ und $T_{2,\text{längs}}^+ = 0,58\text{ s}$ abgeleitet.

Für negative Sprünge wird ein PT_2 -Glieder mit der Übertragungsfunktion

$$G_{\text{längs}}^-(s) = \frac{K_{\text{längs}}^-}{T_{1,\text{längs}}^- s^2 + T_{2,\text{längs}}^- s + 1}$$

und den zu identifizierenden Parametern $K_{\text{längs}}^-$, $T_{1,\text{längs}}^-$ und $T_{2,\text{längs}}^-$ angesetzt. Da die Ist-Beschleunigung im eingeschwungenen Zustand der Soll-Beschleunigung entspricht, wird die Verstärkung mit $K_{\text{längs}}^- = 1$ festgelegt. Das dynamische Verhalten für negative Beschleunigungssprünge zeigt keine signifikante Abhängigkeit von der Geschwindigkeit oder der Motordrehzahl und lässt sich mit den Zeitkonstanten $T_{1,\text{längs}}^- = 0,08\text{ s}$ und $T_{2,\text{längs}}^- = 0,36\text{ s}$ annähern.

3.2.2 Begrenzungen des Beschleunigungsvermögens

Die vorangegangene Approximation der Fahrzeuglängsdynamik durch lineare Übertragungsglieder ist geeignet, das zeitliche Beschleunigungsverhalten nachzubilden. Begrenzungen der Fahrzeugbeschleunigung, wie sie für reale Fahrzeuge auftreten, bleiben dabei unberücksichtigt. Für das Versuchsfahrzeug ergeben sich Beschränkungen der umsetzbaren Beschleunigung einerseits durch ein begrenztes motorseitiges Antriebsmoment, andererseits durch begrenzte Kräfte, die zwischen Reifen und Fahrbahn übertragen werden können.

Die maximale positive Beschleunigung ergibt sich aus der Kräftebilanz zwischen der Antriebskraft und den Fahrwiderständen, die der Längsbewegung entgegenwirken. Entsprechend Mitschke und Wallentowitz (2004) sind dies bei trockener und ebener Fahrbahn im Wesentlichen der Luftwiderstand und der Radwiderstand, der wiederum hauptsächlich durch die Rollreibung bestimmt wird. Die maximale Antriebskraft ist abhängig vom

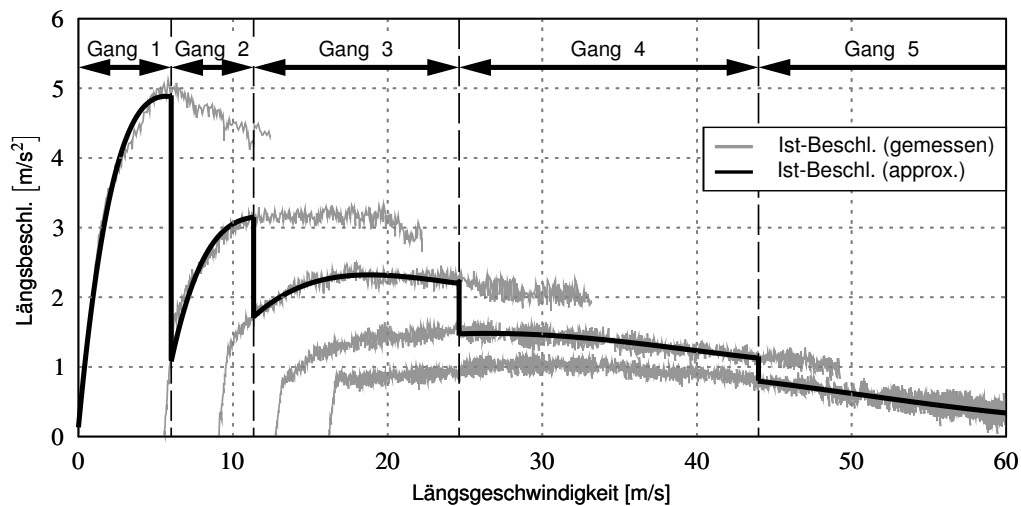


Abbildung 3.4: Zuordnung von Gängen in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen und daraus resultierende positive Maximalbeschleunigungen.

eingelezten Gang sowie der momentanen Drehzahl des Motors. Die Ermittlung des positiven Beschleunigungsvermögens erfolgte in dieser Arbeit experimentell. Dazu sind in Abbildung 3.4 die unter Vollastbetrieb resultierenden Beschleunigungen der ersten fünf Gänge in Abhängigkeit von der Längsgeschwindigkeit dargestellt. Die Verläufe der realen Messungen werden mit Polynomen vierter Ordnung angenähert. Da die Gangwahl einer komplexen Schaltstrategie des vorhandenen Automatikgetriebes folgt, wird für das Modell vereinfachend von zwei Annahmen ausgegangen. Zunächst wird angenommen, dass bei jeder Geschwindigkeit der Gang mit der maximal möglichen Beschleunigung eingestellt ist. Dies wird durch die zweite Annahme eingeschränkt, bei der im Sinne eines komfortorientierten Assistenzsystems von einer maximalen Motordrehzahl für den eingelezten Gang ausgegangen wird.²⁶ Wird diese Motordrehzahl überschritten, ist in dem Modell ein Wechsel in den nächsthöheren Gang vorgesehen. Die Schaltpunkte wurden durch einen Fahrversuch mit maximaler positiver Beschleunigungsanforderung ermittelt. Die resultierenden Geschwindigkeitsbereiche mit dem jeweils zugeordneten Gang, sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Insbesondere in Hinblick auf die in dieser Arbeit betrachteten Überholmanöver wird davon ausgegangen, dass eventuelle Schaltvorgänge vor Beginn des Manövers durchgeführt werden.

Die negative Maximalbeschleunigung ist abhängig vom Reibwert zwischen Fahrbahnbelag und Reifen. Unter der Annahme einer trockenen Fahrbahn wird eine maximale Verzögerung von -10 m/s^2 im gesamten Geschwindigkeitsbereich gewählt.

²⁶Die Geräuscentwicklung bei hohen Motordrehzahlen wirkt sich negativ auf den Fahrkomfort aus.

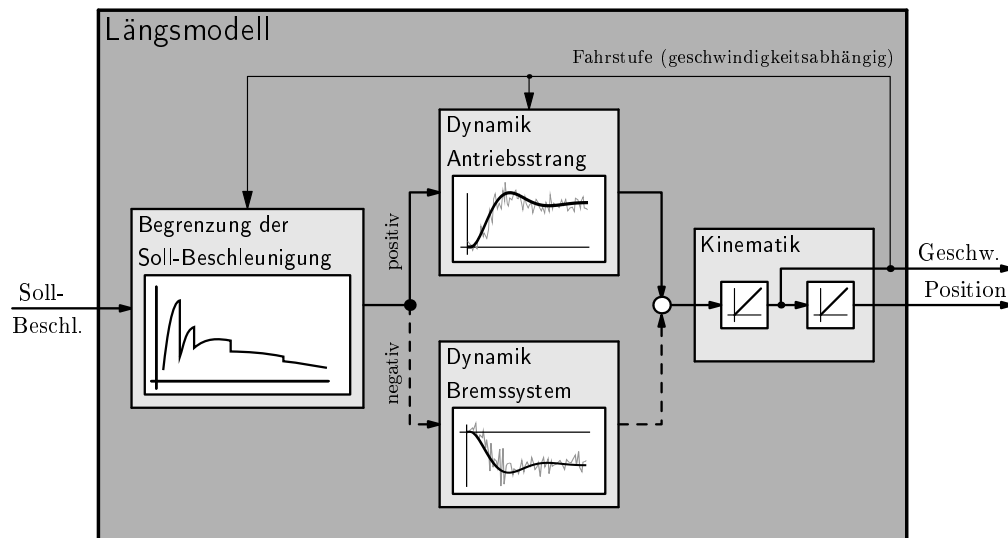


Abbildung 3.5: Struktur des Modells zur Annäherung der Fahrzeuglängsbewegung.

3.2.3 Längsmodell und Validation

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Eigenschaften der Fahrzeugbewegung werden nun zu einem Längsmodell zusammengeführt. Das resultierende Modell ermöglicht die Simulation der Fahrzeuglängsbewegung unter dem Einfluss eines Fahrerassistenzsystems.

Die Struktur des Modells ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Als Eingangsgröße dient die durch das Assistenzsystem vorgegebene Soll-Beschleunigung in Längsrichtung. Abhängig von der momentanen Geschwindigkeit wird entsprechend Abschnitt 3.2.2 der eingelegte Gang ermittelt, aus dem sich eine Begrenzung der Soll-Beschleunigung ergibt. Abhängig vom Vorzeichen der Anforderung dient die begrenzte Beschleunigungsvorgabe als Eingangssignal für die Übertragungsglieder, die das dynamische Verhalten des Antriebsstrangs bzw. des Bremssystems approximieren. Die Parametrierung dieser Übertragungsglieder ist entsprechend Abschnitt 3.2.1 wiederum geschwindigkeitsabhängig. Die beiden Signalpfade schließen sich dabei wechselseitig aus, d. h. Bremssystem und Antriebsstrang greifen niemals gleichzeitig in die Fahrzeugbewegung ein. Das Ausgangssignal der Übertragungsglieder entspricht der umgesetzten Ist-Beschleunigung des Fahrzeugs. Gemäß der Kinematik der Fahrzeugbewegung ergibt sich die Geschwindigkeit und Position des Fahrzeugs durch sukzessive Integration der Ist-Beschleunigung.

Die Eignung des Modells, das reale Fahrverhalten im Arbeitsbereich des zu entwerfenden Assistenzsystems abzubilden, wird im Folgenden durch die Vorgabe zufälliger Soll-Beschleunigungen untersucht. In Abbildung 3.6 ist beispielhaft der Verlauf eines solchen Versuchs abgebildet. Abbildung 3.6(a) zeigt den Verlauf der Soll-Beschleunigung sowie die während der Versuchsfahrt gemessene und die mit dem Längsmodell simulierte Ist-

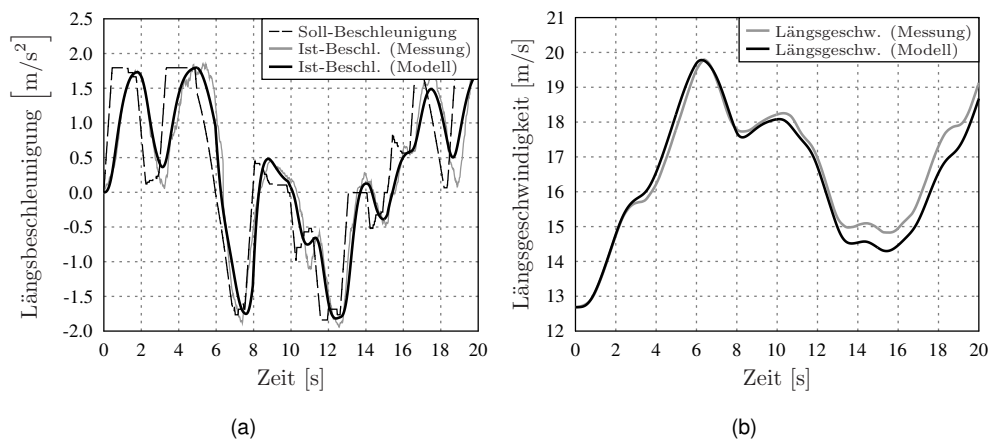


Abbildung 3.6: Validierung des Modells der Fahrzeuglängsbewegung anhand zufälliger Vorgaben der Soll-Beschleunigung. Verglichen werden die Ausgangsgrößen des Modells mit Messungen (a) der Ist-Beschleunigung und (b) der Geschwindigkeit während eines Fahrversuchs.

Beschleunigung. Die Beschleunigungsvorgaben bewegen sich in einem Bereich zwischen 2 m/s^2 und -2 m/s^2 , wobei sich die Vorgabewerte, anders als bei den sprunghaften Vorgaben zur Systemidentifikation, kontinuierlich ändern. Um die Übereinstimmung der Simulation mit dem realen Verhalten abschätzen zu können, sind in Abbildung 3.6(b) die jeweiligen Geschwindigkeitsverläufe während des Manövers gegenübergestellt.

Aus den Fahrversuchen zur Validierung des Fahrzeuglängsmodells ist eine qualitative Übereinstimmung mit dem realen Fahrverhalten ersichtlich. Dies ist für die vorliegende Arbeit ausreichend, da das hergeleitete Modell lediglich zur Überprüfung und Darstellung der grundlegenden Funktionsweise der in Kapitel 4 entworfenen Regelungen genutzt wird. Die letztendliche Auslegung der Regelung – insbesondere die Bewertung hinsichtlich der Komforteigenschaften – erfolgt anhand von Versuchsfahrten.

3.3 Modellierung der Querbewegung

Im folgenden Abschnitt wird ein Modell der Querbewegung des Versuchsfahrzeugs hergeleitet. Der Quereingriff des zu entwerfenden Assistenzsystems erfolgt durch Ansteuerung der serienmäßig vorhandenen Lenkanlage²⁷. Über eine Momentenschnittstelle wird dem Elektromotor der Lenkung ein Soll-Moment vorgeben, mit dem sich der Einschlagwinkel der Vorderräder beeinflussen lässt. Dieser Lenkwinkel führt schließlich zu einer Querbewegung des Fahrzeugs.

²⁷Vgl. Abschnitt 5.1

Um ein Modell der Fahrzeugquerbewegung zu erhalten, wird in Abschnitt 3.3.1 zunächst die Dynamik des Lenkaktors approximiert. Wegen der Komplexität der unterlagerten Momentenregelung wird das Systemverhalten experimentell bestimmt. Dazu werden sprungförmige Soll-Momente aufgeschaltet und die Systemantworten ausgewertet. Das resultierende Übertragungsverhalten beschreibt die Umsetzung der Momentenanforderung in ein vom Aktor aufgebrachtes Lenkmoment.

Durch das Motormoment wird der Vorderradeinschlagwinkel beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen dem Einschlagwinkel und der Fahrzeugbewegung wird in Abschnitt 3.3.2 durch ein Einspurmodell beschrieben.

In Abschnitt 3.3.3 wird die Aktordynamik und das Einspurmodell zu einem Modell der Querbewegung zusammengefasst. Die Gültigkeit des resultierenden Modells wird durch den Vergleich von Simulationen mit realen Fahrversuchen abgeschätzt.

3.3.1 Dynamik des Lenkaktors

Das zu entwerfende Assistenzsystem greift über die Vorgabe eines Soll-Lenkmoments in die Querbewegung des Versuchsfahrzeugs ein. Wie in Abbildung 3.7(a) dargestellt, wird diese Vorgabe durch das Lenkungssteuergerät in ein Steuersignal für den Elektromotor umgesetzt. Das vom Motor aufgebrachte Moment bewirkt über ein Ritzel die Verschiebung der Zahnstange, wodurch sich letztendlich eine Änderung des Vorderradeinschlagwinkels ergibt. An der Zahnstange befindet sich neben dem Motorritzel ebenfalls ein Lenkritzel mit Momentegeber, das über die Lenksäule mit dem Lenkrad verbunden ist.

Um das Übertragungsverhalten der Momentenvorgabe zu einem umgesetzten Lenkmoment abzuschätzen, werden sprunghafte Änderungen des Soll-Moments aufgeschaltet. Anhand des gemessenen Moments am Lenkritzel kann auf die Dynamik des Aktors geschlossen werden. Damit die Fahrzeugbewegung und die Rückstellmomente an den Vorderrädern die Messung nicht beeinflussen, erfolgt die Aufschaltung der Sprünge bei Geradeausfahrt und mit fixiertem Lenkrad. Versuche bei variierenden Geschwindigkeiten im Bereich von 5-30 m/s ergaben keine relevante Geschwindigkeitsabhängigkeit der Aktordynamik. In Abbildung 3.7(b) ist beispielhaft ein Sprung des Soll-Lenkmoments von 0 Nm auf 3 Nm bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s dargestellt. Anhand der Sprungantwort ist erkennbar, dass ein PT_1 -Glied mit der Übertragungsfunktion

$$G_{\text{Lenkung}}(s) = \frac{K_{\text{Lenkung}}}{T_{\text{Lenkung}} s + 1}$$

für die Approximation der Aktordynamik geeignet ist. Da das gemessene Moment nach einer Übergangsphase dem Vorgabewert entspricht, wird $K_{\text{Lenkung}} = 1$ angenommen. Als Zeitkonstante wurde $T_{\text{Lenkung}} = 0,17 \text{ s}$ für den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich identifiziert.

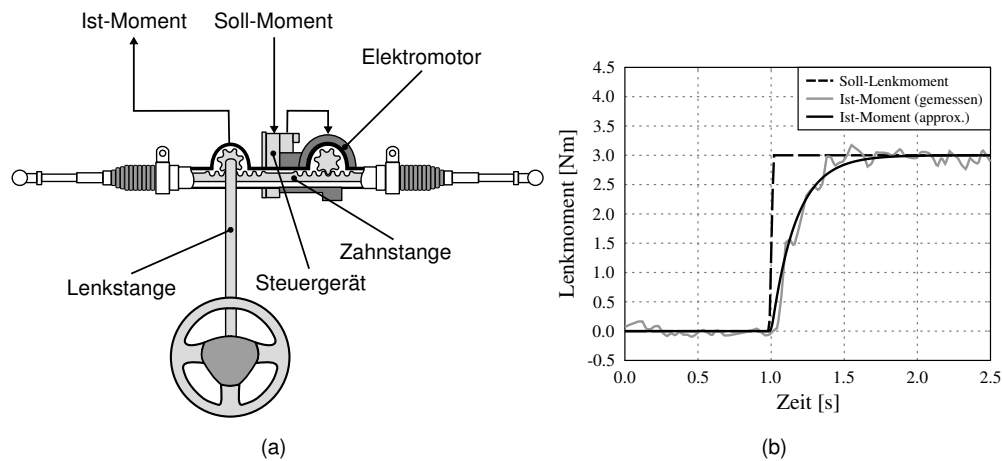


Abbildung 3.7: (a) Aufbau der Lenkanlage, (b) sprungförmige Anregung des Lenkaktors mit gemessener und approximierter Sprungantwort.

3.3.2 Einspurmodell der Querdynamik

Der im vorangegangenen Abschnitt modellierte Eingriff des Lenkaktors führt zu einem Radeinschlagwinkel der Vorderräder. Um die daraus resultierende Fahrzeugbewegung herzuleiten, wird im Folgenden ein Einspurmodell verwendet. Die Ausführungen folgen der Darstellung von Mitschke und Wallentowitz (2004).

Das Einspurmodell basiert auf Annahmen, durch die eine Beschreibung der Fahrzeugbewegung vereinfacht wird. Es wird von alltäglichen Fahrsituationen unterhalb der Kraftschlussgrenze auf ebener Fahrbahn ausgegangen, sodass die Wirkung von Wankbewegungen und Radlastverlagerungen auf die Querdynamik vernachlässigt werden kann. Unter dieser Annahme besitzt die vertikale Position des Fahrzeugschwerpunkts keinen Einfluss auf die Fahrzeugbewegung und kann in die Fahrbahnebene gelegt werden. Außerdem können die Räder einer Achse zu einem Rad in der Achsmitte zusammengefasst werden. Weiterhin werden kleine Reifenschräglaufwinkel angenommen, für die ein proportionaler Zusammenhang zwischen dem Schräglaufwinkel und den an den Reifen angreifenden Querkräften besteht.

Mit diesen Annahmen ergeben sich die in Abbildung 3.8 dargestellten kinematischen und kinetischen Größen, die im Folgenden bilanziert und zur Bildung von Bewegungsgleichungen herangezogen werden. l_h und l_v bezeichnen dabei die Abstände von der Hinter- bzw. Vorderachse zum Fahrzeugschwerpunkt. Der Geschwindigkeitsvektor wird mit \mathbf{v} benannt, wobei sich für die Bewegung des Hinter- bzw. Vorderrads die Geschwindigkeitsvektoren \mathbf{v}_h und \mathbf{v}_v ergeben. Der Differenzwinkel zwischen \mathbf{v} und der Fahrzeuglängsachse wird als Schwimmwinkel β bezeichnet. Die eingeschlossenen Winkel zwischen der Laufrichtung des Hinter- bzw. Vorderrads und den zugehörigen Geschwindigkeitsvektoren werden als Schräglaufwinkel α_h bzw. α_v bezeichnet. Die Geschwindigkeit, mit der das Fahrzeug um

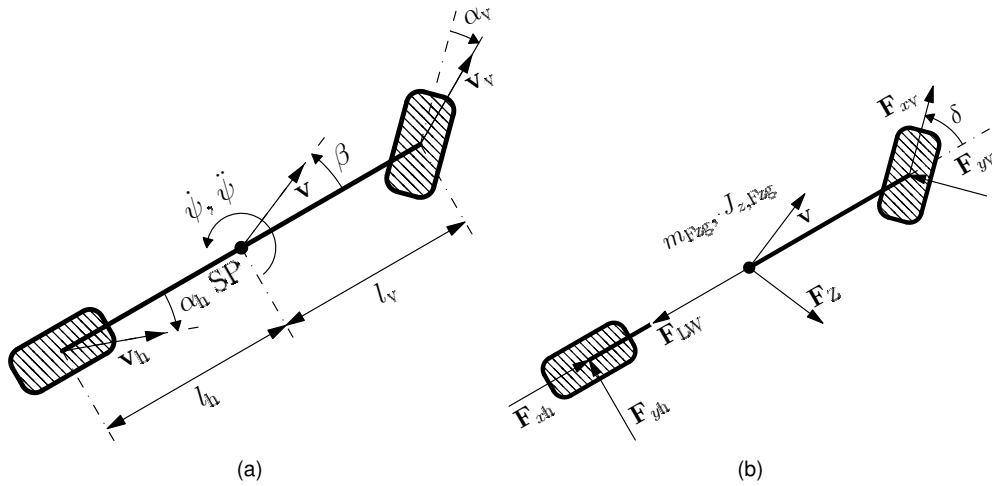


Abbildung 3.8: (a) Kinematische und (b) kinetische Größen des Einspurmodells.

die Hochachse rotiert, wird als Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ bezeichnet. Die Änderung der Winkelgeschwindigkeit entspricht der Winkelbeschleunigung $\ddot{\psi}$. Der Radeinschlagwinkel der Vorderräder wird mit δ beschrieben. Abbildung 3.8(b) zeigt die am Fahrzeug angreifenden Kräfte. Bei Windstille wirkt entlang der Fahrzeuglängsachse die Luftwiderstandskraft F_{LW} . An den Rädern greifen in Längsrichtung die Antriebskräfte F_{xh} bzw. F_{xv} und in Querrichtung die Seitenkräfte F_{yh} bzw. F_{yv} an. Im Schwerpunkt wirkt die Zentripetalkraft F_Z . Die Wirkung der Kräfte und Momente ist weiterhin abhängig von der Fahrzeugmasse m_{Fzg} und dem Trägheitsmoment um die Hochachse $J_{z,Fzg}$. Aus den Kräftegleichgewichten in Längs- und Querrichtung sowie aus dem Momentengleichgewicht im Schwerpunkt um die Hochachse ergeben sich mit den entsprechenden Beträgen der Vektoren die Gleichungen

$$\begin{aligned} 0 &= F_Z \sin \beta - m_{Fzg} \dot{v} \cos \beta + F_{xh} - F_{LW} + F_{xv} \cos \delta - F_{yv} \sin \delta \\ 0 &= -F_Z \cos \beta - m_{Fzg} \dot{v} \sin \beta + F_{yh} + F_{xv} \sin \delta + F_{yv} \cos \delta \\ 0 &= J_{z,Fzg} \ddot{\psi} - (F_{yv} \cos \delta + F_{xv} \sin \delta) l_v + F_{yh} l_h. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Die Geschwindigkeitsbilanzen in Längs- und Querrichtung liefern die Gleichungen

$$\begin{aligned} v \cos \beta &= v_h \cos \alpha_h = v_v \cos (\delta - \alpha_v) \\ v_h \sin \alpha_h &= l_h \dot{\psi} - v \sin \beta \\ v_v \sin (\delta - \alpha_v) &= l_v \dot{\psi} + v \sin \beta. \end{aligned}$$

Unter der Annahme kleiner Schräglaufwinkel α_v und α_h ist eine Linearisierung mit $\tan \alpha \approx \alpha$, $\sin \alpha \approx \alpha$ und $\cos \alpha \approx 1$ zulässig. Für die Schräglaufwinkel ergibt sich damit die Beziehung

$$\begin{aligned} \alpha_h &= \frac{l_h \dot{\psi}}{v} - \beta \\ \alpha_v &= \delta - \frac{l_v \dot{\psi}}{v} - \beta. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Für die betrachteten kleinen Schräglaufwinkel verhalten sich die Beträge der Seitenkräfte F_{yh} und F_{yv} proportional zu den Schräglaufwinkeln α_h und α_v . Die Proportionalitätsfaktoren werden als Reifenseitensteifigkeiten c_h und c_v bezeichnet. Die Seitenkräfte lassen sich damit nach

$$\begin{aligned} F_{yh} &= c_h \cdot \alpha_h \\ F_{yv} &= c_v \cdot \alpha_v \end{aligned} \quad (3.3)$$

bestimmen.

Durch Einsetzen der Gleichungen (3.2) und (3.3) in (3.1) lässt sich nach Umformung die Zustandsraumdarstellung

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-c_h - c_v}{m_{Fzg} v} & \frac{c_h l_h - c_v l_v}{m_{Fzg} v^2} - 1 \\ \frac{c_h l_h - c_v l_v}{J_{z,Fzg}} & \frac{-c_h l_h^2 - c_v l_v^2}{J_{z,Fzg} v} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{c_v}{m_{Fzg} v} \\ \frac{c_v l_v}{J_{z,Fzg}} \end{bmatrix} \cdot \delta \quad (3.4)$$

angeben, mit dem Schwimmwinkel β und der Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ als Zustandsgrößen. Die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit v wird als quasistationärer Parameter angenommen. Als Eingangsgröße dient der Lenkwinkel δ .

Zur Parameteridentifikation wurde der Versuchsträger vorübergehend mit einer Inertialplattform und einer Lenkmaschine ausgerüstet. Über die Lenkmaschine wurden bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten sinusförmige Lenkmanöver mit variierender Frequenz und Amplitude durchgeführt. Die Auswertung der mit der Inertialplattform gemessenen Fahrzeugbewegung ergab schließlich die Parameter des Einspurmodells.²⁸

3.3.3 Quermodell und Validation

Um die Fahrzeugbewegung unter dem Einfluss von Quereingriffen seitens eines Fahrerassistenzsystems zu simulieren, werden die in den vorangegangenen Abschnitten modellierten Komponenten in einem Quermodell zusammengefasst. Eingriffe durch den Fahrer und die Beeinflussung der Fahrzeugbewegung durch Seitenwind oder eine geneigte Fahrbahn werden als nicht modellierte Störgrößen angesehen. Die Gültigkeit des Quermodells für den betrachteten Arbeitsbereich wird durch den Vergleich von Simulationen mit realen Testfahrten überprüft.

In Abbildung 3.9 ist die Struktur des Quermodells dargestellt. Über die Vorgabe eines Soll-Lenkmoments greift das Assistenzsystem in die Fahrzeugbewegung ein. Mit der in Abschnitt 3.3.1 identifizierten Aktordynamik wird diese Vorgabe in ein Ist-Moment umgesetzt. Das tatsächlich zur Änderung des Einschlagwinkels wirkende Moment ergibt sich durch Überlagerung des Ist-Moments mit dem vom Fahrer aufgebrauchten Lenkradmoment und dem konstruktiv bedingten Rückstellmoment, das bei Bewegung des Fahrzeugs an

²⁸Dank gilt an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. Gregor Stock sowie Herrn Dipl.-Ing. (FH) Robert Lasslop für die Durchführung und Auswertung der Versuche.

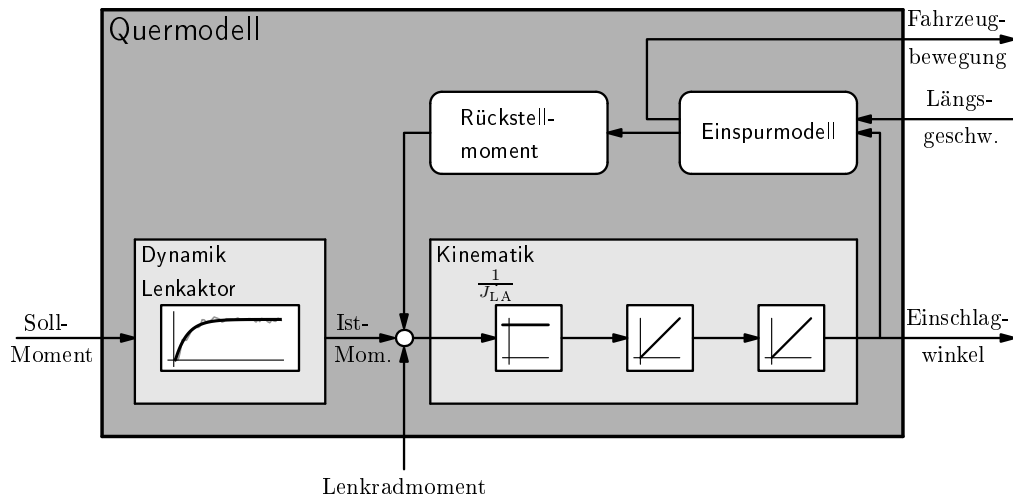


Abbildung 3.9: Struktur des Modells zur Annäherung der Fahrzeugquerbewegung.

den Vorderrädern angreift. Als Reaktion auf das resultierende Lenkmoment ergibt sich zunächst eine Winkelbeschleunigung. Diese ist abhängig vom Trägheitsmoment J_{LA} der Lenkanlage und der Räder. Zweifache Integration der Winkelbeschleunigung liefert den Einschlagwinkel der Vorderräder δ . Dieser dient dem in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Einspurmodell als Eingangsgröße. Als Parameter geht zusätzlich die momentane Längsgeschwindigkeit in das Einspurmodell ein. Der Ausgang des Einspurmodells liefert die modellierten Zustandsgrößen der Fahrzeugbewegung. Mit dem momentanen Bewegungszustand ergeben sich die Reifenseitenkräfte aus den Gleichungen (3.2) und (3.3). Das resultierende Rückstellmoment an den Vorderrädern lässt sich damit nach

$$\begin{aligned} M_{\text{Rück}} &= F_{yV} n_V \\ &= c_v \left(\delta - \frac{l_v \dot{\psi}}{v} - \beta \right) (n_k + n_R) \end{aligned}$$

berechnen, mit dem Gesamtnachlauf n_V , der sich wiederum aus einem konstruktiven Nachlauf n_k und einem Reifennachlauf n_R zusammensetzt (Mitschke und Wallentowitz 2004). Für die betrachteten kleinen Schräglaufwinkel wird der Reifennachlauf als konstant betrachtet und ein Gesamtnachlauf von $n_V = 53 \text{ mm}$ angenommen.

Neben den genannten Vereinfachungen wird bei dem vorliegenden Modell die Steifigkeit der Lenkanlage vernachlässigt. Weiterhin wird ein konstantes Trägheitsmoment von $J_{LA} = 0,048 \text{ kgm}^2$ für den gesamten betrachteten Geschwindigkeitsbereich angenommen. Die Validation des Modells erfolgt durch die Vorgabe zufälliger Momentenanforderungen und den Vergleich der simulierten Fahrzustände mit Messdaten aus realen Fahrversuchen. Hinsichtlich des Verwendungszwecks zur Simulation von Fahrmanövern in alltäglichen Fahrsituationen werden kontinuierliche Änderungen im Bereich von $\pm 3 \text{ Nm}$ vorgegeben. Für eine konstante Längsgeschwindigkeit von 20 m/s ist ein solcher Versuch in Abbildung 3.10 dargestellt. In Abbildung 3.10(a) ist eine gute Übereinstimmung zwischen dem

3.4 Modellierung der Längs- und Querbewegung

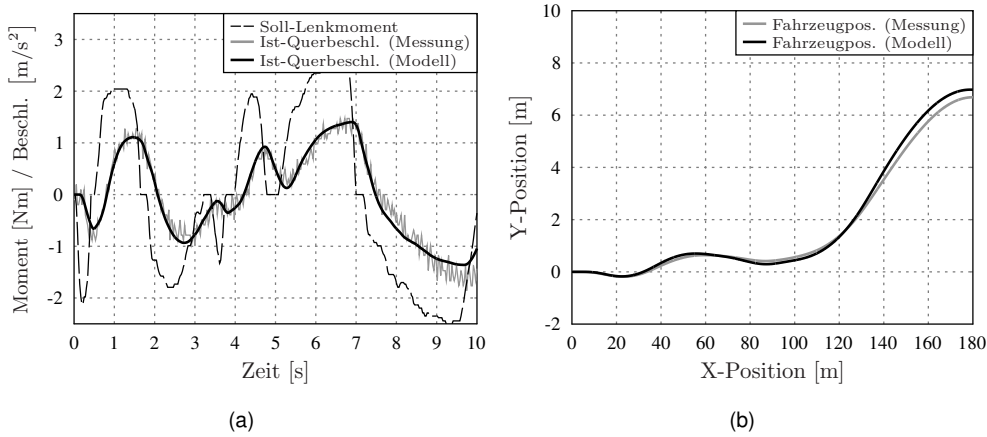


Abbildung 3.10: Validierung des Modells der Fahrzeugquerbewegung anhand zufälliger Vorgaben eines Soll-Lenkmoments des Aktors. Verglichen werden die Ausgangsgrößen des Modells mit Messungen (a) der Querbeschleunigung und (b) der absoluten Fahrzeugposition während eines realen Fahrversuchs.

gemessenen und dem simulierten Querbeschleunigungsverlauf zu erkennen. Abbildung 3.10(b) zeigt weiterhin die gemessene und simulierte Bewegung des Fahrzeugschwerpunkts in einem absoluten Koordinatensystem. Das reale Fahrzeugverhalten wird ausreichend genau abgebildet, um die grundlegende Funktionsweise der in späteren Abschnitten zu entwerfenden Regelung zu überprüfen und zu einer ersten Reglerparametrierung zu gelangen.

3.4 Modellierung der Längs- und Querbewegung

In den vorangegangenen Abschnitten 3.2 und 3.3 wurden Modelle der Längs- bzw. Querbewegung des Versuchsfahrzeugs hergeleitet. Da das zu entwerfende Assistenzsystem gleichzeitig in die Längs- und Querdynamik eingreift, werden im Folgenden die beiden Teilmodelle zu einem gemeinsamen Modell zusammengefasst.

Nach Drenckhahn (2006) bestehen zwei wesentliche Kopplungen zwischen der Längs- und der Querbewegung. So wirkt sich die momentane Geschwindigkeit in Fahrzeiglängsrichtung nach den in der Zustandsraumdarstellung (3.4) des Einspurmodells dargestellten Zusammenhängen auf die Fahrzeugdynamik in Querrichtung aus. Eine weitere Wechselwirkung tritt bei Kurvenfahrt auf. Aus den Seitenkräften an den Reifen resultiert eine Kraft, die der Fahrzeugbewegung in Längsrichtung entgegenwirkt. Diese Kraft wird als Kurvenwiderstand bezeichnet und lässt sich mit Hilfe der Seitenkräfte F_{yh} und F_{yv} nach Gleichung (3.3), der Zustandsgröße β des Einspurmodells aus Gleichung (3.4) sowie dem Lenkwinkel δ mit

$$F_{KW} = -F_{yh}\beta + F_{yv}(\delta - \beta)$$

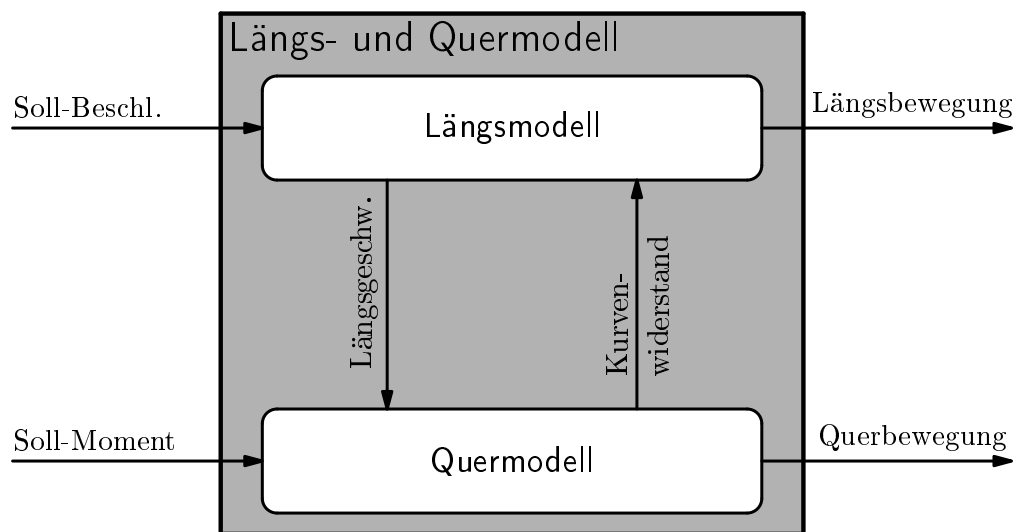


Abbildung 3.11: Struktur des Modells zur Annäherung der Längs- und Querbewegung.

bestimmen.

Die Struktur des kombinierten Modells der Fahrzeugbewegung ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Die Teilmodelle der Längs- und Querbewegung sind auf die beschriebene Weise über die Längsgeschwindigkeit und den Kurvenwiderstand verknüpft. Verwendung findet das kombinierte Modell bei der Simulation des Fahrzeugverhaltens unter dem Einfluss der im folgenden Kapitel 4 entworfenen Längs- und Querregelung.

Kapitel 4

Regelung

Die Entwicklung der Automaten
gibt der menschlichen Rasse
eine neue und sehr nützliche
Ansammlung mechanischer
Sklassen, die ihre Arbeit
verrichten.

(Norbert Wiener, 1894-1964)

Im folgenden Kapitel wird der Entwurf eines Regelungssystems zur automatisierten Längs- und Querführung eines Fahrzeugs dargestellt. Die Anforderungen an die hierfür zu entwerfenden Regler ergeben sich aus der in Abschnitt 1.2 formulierten Zielsetzung. Demnach soll eine Wunschgeschwindigkeit vom Fahrzeugführer vorgegeben werden können, der sich das Fahrzeug im Falle freier Fahrt bzw. bei schnelleren Vorderfahrzeugen anpasst. Liegt eine Störung durch ein langsames Vorderfahrzeug vor, soll ein vom Fahrer einstellbarer Wunschabstand eingehalten werden. In Querrichtung soll der Fahrer bei der Führung des Fahrzeugs entlang der Fahrstreifenmitte unterstützt werden. Schließlich soll eine Assistenz bei der Durchführung eines fahrerinitiierten Überholmanövers entworfen werden, bei der eine integrierte Längs- und Querregelung zum Einsatz kommt.

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz zur automatisierten Fahrzeugführung wird in Abschnitt 4.1 dargestellt. In einem Überblick werden die Komponenten des Regelungssystems und deren strukturelle Zusammenhänge erläutert. Weiterhin wird das Prinzip der *Sliding-Mode*-Regelung vorgestellt.

In Abschnitt 4.2 wird ein *Sliding-Mode*-Regler für die automatisierte Abstandsregelung entworfen. Es wird gezeigt, wie durch geeignete Modifikationen der Regelung eine anschauliche Anpassung des Reglerverhaltens ermöglicht wird.

Abschnitt 4.3 beschreibt den Entwurf einer *Sliding-Mode*-Regelung zur automatisierten Querführung. Wie schon bei der Abstandsregelung ist auch hier eine intuitive Auslegung des Reglerverhaltens möglich.

Der bisher getrennte Entwurf der Längs- und Querführung wird in Abschnitt 4.4 durch einen integrierten Ansatz ergänzt. Der Mehrwert einer gleichzeitigen Betrachtung wird anhand eines automatisiert durchgeführten Überholvorgangs dargestellt.

Die in den Abschnitten 4.2 bis 4.4 beschriebenen Regler geben eine Soll-Beschleunigung in Längs- bzw. Querrichtung vor. Die Umsetzung dieser Soll-Werte in eine Fahrzeugbewegung wird von unterlagerten Beschleunigungsregelungen vorgenommen, über die in Abschnitt 4.5 ein Überblick gegeben wird.

4.1 Ansatz zur automatisierten Fahrzeugführung

Der folgende Abschnitt dient der Orientierung und gibt einen Überblick über das in dieser Arbeit vorgestellte System zur automatisierten Fahrzeugführung. Die Beschreibung der Systemkomponenten und deren Zusammenhänge untereinander erfolgt auf funktionaler Ebene.

Regelungstechnische Vorgehensweise

Für die vorliegende Arbeit wird ein Regelungsansatz verfolgt, der sich in zwei Regelungsschichten untergliedert. In einer übergeordneten Schicht werden Vorgaben in Form von Soll-Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung generiert. Diese Beschleunigungsvorgaben werden daraufhin in einer unterlagerten Regelungsschicht durch die Ansteuerung der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Aktorik in eine Fahrzeugbewegung umgesetzt. Abbildung 4.1 stellt diese Struktur dar und ordnet die Themenbereiche Textteilen in der Arbeit zu.

Die Komponenten der übergeordneten Regelungsschicht umfassen

- einen *Geschwindigkeitsregler* (vgl. Abschnitt 4.1.1), der die vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit einregelt,
- einen *Abstandsregler* (vgl. Abschnitt 4.2), der im Falle einer Störung durch ein langsamerer Vorderfahrzeugs einen vom Fahrer einstellbaren Wunschabstand einhält,
- einen *Querregler* (vgl. Abschnitt 4.3), der sowohl die Querführung entlang der Fahrstreifenmitte als auch auf Fahrerwunsch die Durchführung eines Fahrstreifenwechsels übernimmt und
- einen *integrierten Längs- und Querregler* (vgl. 4.4), der die benötigte Längs- und Querbeschleunigung für einen Fahrstreifenwechsel hinter einem langsameren Vorderfahrzeug erzeugt. Für ein solches Manöver werden die Anforderungen des Abstands- bzw. Querreglers vernachlässigt und ausschließlich die Vorgaben des integrierten Reglers umgesetzt.

Da die angeforderte Beschleunigung in Längsrichtung nicht zu einer Überschreitung der Wunschgeschwindigkeit führen sollen, wird sowohl die Ausgabe des Abstandsreglers als auch die der integrierten Regelung auf die Ausgangsgröße des Geschwindigkeitsreglers begrenzt.

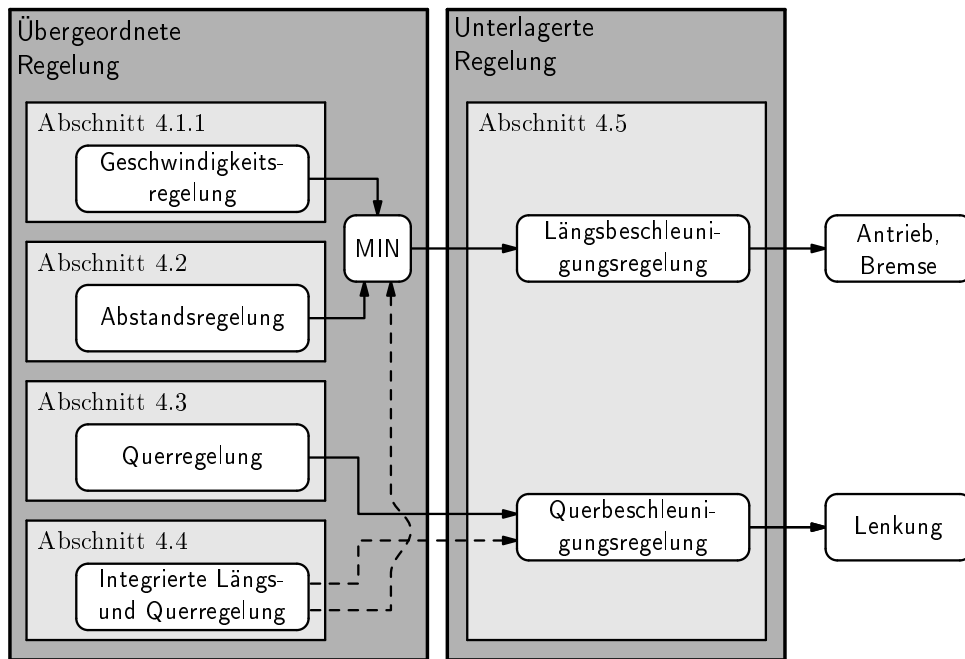


Abbildung 4.1: Übersicht über den Regelungsansatz mit Zuordnung zu Textteilen in der Arbeit.

In der unterlagerten Regelungsschicht erfolgt die Umsetzung der Beschleunigungsvorgaben in Stellsignale für die Fahrzeugaktuatorik (vgl. Abschnitt 4.5). Diese Ebene besteht aus

- einem *Längsbeschleunigungsregler*, der die Soll-Beschleunigung in Längsrichtung durch eine geeignete Ansteuerung des Antriebsstrangs bzw. des Bremssystems in eine Fahrzeugbeschleunigung umsetzt und
- einem *Querschleunigungsregler*, der durch geeignete Lenkeingriffe die gewünschte Fahrzeugbeschleunigung in Querrichtung einstellt.

Die unterlagerten Regelungen sollen wesentliche Störeinflüsse wie die Fahrbahnsteigung oder die Fahrbahnneigung sowie Nichtlinearitäten der Aktorik kompensieren. Aus Sicht der übergeordneten Regler ergibt sich dadurch ein lineares Streckenverhalten.

Als einfachste Regelungsaufgabe bei der automatisierten Fahrzeugführung ist die Geschwindigkeitsregelung anzusehen. Wird wie im vorliegenden Fall eine unterlagerte Regelung der Längsbeschleunigung vorausgesetzt, lässt sich bereits mit einem Proportional-Regler ein Regelkreis mit stationärer Genauigkeit realisieren.²⁹ Da die Geschwindigkeitsregelung kein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit ist, wird in Abschnitt 4.1.1 lediglich ein

²⁹Mit der Geschwindigkeit als Regelgröße und der Beschleunigung als Stellgröße besitzt die Regelstrecke bereits ein einfach integrierendes Verhalten.

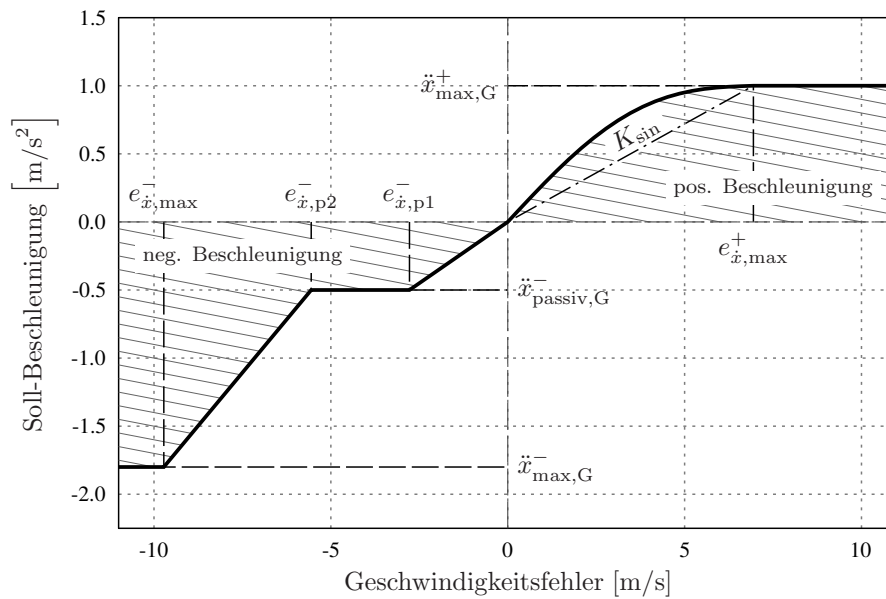


Abbildung 4.2: Kennlinie des Geschwindigkeitsreglers. Das Reglerverhalten wird durch die eingezeichneten Parameter bestimmt.

kurzer Überblick über das Regelungsverfahren gegeben. Alle weiteren Regler der übergeordneten Schicht basieren auf dem sogenannten *Sliding-Mode*-Prinzip, das in Abschnitt 4.1.2 erläutert wird.

4.1.1 Geschwindigkeitsregelung

Die Aufgabenstellung für die Geschwindigkeitsregelung besteht darin, die vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit zu halten, auf diese Geschwindigkeit zu beschleunigen oder zu verzögern. Die Wunschgeschwindigkeit soll dabei möglichst komfortabel eingeregelt werden, d. h. es sollen keine starken positiven oder negativen Beschleunigungen auftreten. Dennoch soll die vorgegebene Geschwindigkeit in angemessener Zeit erreicht werden.

Im Folgenden wird ein Kennlinienregler entworfen, der die genannten Komfortanforderungen erfüllt. In Abbildung 4.2 werden die Parameter zur Konstruktion der zugrunde liegenden Reglerkennlinie veranschaulicht. Diese Kennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeitsfehler $e_{\dot{x}} = \dot{x}_{\text{soll}} - \dot{x}_{\text{ist}}$ als Eingangsgröße und der erzeugten Soll-Beschleunigung $\ddot{x}_{\text{soll,G}}$ als Ausgangsgröße. Dabei entspricht \dot{x}_{soll} der Wunschgeschwindigkeit und \dot{x}_{ist} der momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit. Das Verhalten der Geschwindigkeitsregelung lässt sich abhängig vom Vorzeichen des Geschwindigkeitsfehlers in ein positives und ein negatives Beschleunigungsverhalten unterteilen.

Beschleunigungsverhalten (positiv)

Für $e_{\dot{x}} > 0$ m/s ist die Fahrzeuggeschwindigkeit kleiner als die Wunschgeschwindigkeit, so dass positive Soll-Beschleunigungen generiert werden. Als Basis für das Beschleunigungsverhalten dient ein linearer Zusammenhang zwischen Differenzgeschwindigkeit und Soll-Beschleunigung. Um unangemessen starke Beschleunigungen zu vermeiden, wird der Parameter $\ddot{x}_{\max,G}^+$ eingeführt, auf den die Stellgröße mit $\ddot{x}_{\text{soll},G} \leq \ddot{x}_{\max,G}^+$ begrenzt wird. Zusammen mit dem Parameter $e_{\dot{x},\max}^+$, der die Differenzgeschwindigkeit bestimmt, bei der die maximale Soll-Beschleunigung ausgegeben wird, ergibt sich die strichpunktiert dargestellte Strecke in Abbildung 4.2. Um ein schleppendes Annähern an die Wunschgeschwindigkeit bei kleinen Differenzgeschwindigkeiten zu vermeiden, wird diesem proportionalen Anteil eine Sinus-Halbwellen mit der Amplitude K_{\sin} überlagert. Dadurch ergibt sich gegenüber dem linearen Zusammenhang eine größere Verstärkung bei kleinen Regelabweichungen. Die Differenzgeschwindigkeit, bei der die maximale Beschleunigung erzeugt wird, bleibt dabei unverändert. Das Beschleunigungsverhalten lässt sich demnach durch

$$\ddot{x}_{\text{soll},G}^+ = \begin{cases} \ddot{x}_{\max,G}^+ \frac{e_{\dot{x}}}{e_{\dot{x},\max}^+} + K_{\sin} \cdot \sin\left(\frac{e_{\dot{x}} \pi}{e_{\dot{x},\max}^+}\right) & , \text{ für } 0 \leq e_{\dot{x}} < e_{\dot{x},\max}^+ \\ \ddot{x}_{\max,G}^+ & , \text{ für } e_{\dot{x},\max}^+ \leq e_{\dot{x}} \end{cases}$$

beschreiben.

Beschleunigungsverhalten (negativ)

Ist die Fahrzeuggeschwindigkeit größer als die Wunschgeschwindigkeit ($e_{\dot{x}} < 0$ m/s), ist eine negative Beschleunigung notwendig. Neben der Bremswirkung durch die Bremsanlage ergibt sich eine Verzögerung durch Fahrwiderstände und das Schleppmoment des Motors. Diese passive Verzögerung wird ausgenutzt, um kleine Regelabweichungen auszugleichen. Auf diese Weise wird ein Ausrollen ermöglicht, ohne dass ein aktiver Bremsengriff stattfindet.

Wie in der linken Halbebene von Abbildung 4.2 dargestellt, nimmt die Verzögerung für geringe Geschwindigkeitsfehler zunächst linear zu, bis die maximale passive Verzögerung $\ddot{x}_{\text{passiv},G}^-$ erreicht wird. Die Steigung dieses Geradenstücks kann über den Parameter $e_{\dot{x},p1}^-$ eingestellt werden. Um einen aktiven Bremsengriff zu vermeiden, wird im Intervall $[e_{\dot{x},p1}^-, e_{\dot{x},p2}^-]$ eine konstante Verzögerung von $\ddot{x}_{\text{passiv},G}^-$ ausgegeben.³⁰ Für Geschwindigkeitsabweichungen, die größer als $e_{\dot{x},p2}^-$ sind, wird die Soll-Verzögerung bis zu der Maximalverzögerung $\ddot{x}_{\max,G}^-$ bei der Differenzgeschwindigkeit $e_{\dot{x},\max}^-$ linear erhöht. Aus dieser

³⁰Die passive Verzögerung ist drehzahl- und geschwindigkeitsabhängig. Fahrversuche haben jedoch gezeigt, dass ohne Beeinträchtigung des Fahrkomforts ein konstanter Wert angesetzt werden kann.

Vorgehensweise ergibt sich das negative Beschleunigungsverhalten nach

$$\ddot{x}_{\text{soll,G}}^- = \begin{cases} \ddot{x}_{\text{max,G}}^- & , \text{ für } e_{\dot{x}} < e_{\dot{x},\text{max}}^- \\ (e_{\dot{x}} + e_{\dot{x},\text{p2}}^-) \cdot \frac{\ddot{x}_{\text{max,G}}^- - \ddot{x}_{\text{passiv,G}}^-}{e_{\dot{x},\text{max}}^- - e_{\dot{x},\text{p2}}^-} - \ddot{x}_{\text{passiv,G}}^- & , \text{ für } e_{\dot{x},\text{max}}^- \leq e_{\dot{x}} < e_{\dot{x},\text{p2}}^- \\ \ddot{x}_{\text{passiv,G}}^- & , \text{ für } e_{\dot{x},\text{p2}}^- \leq e_{\dot{x}} < e_{\dot{x},\text{p1}}^- \\ e_{\dot{x}} \cdot \frac{\ddot{x}_{\text{passiv,G}}^-}{e_{\dot{x},\text{p1}}^-} & , \text{ für } e_{\dot{x},\text{p1}}^- \leq e_{\dot{x}} < 0. \end{cases}$$

Parametrierung

Die Einstellung der Kennlinienparameter wurde durch Versuchsfahrten ermittelt. Neben dem subjektiven Komfortempfinden wurden Vergleichsfahrten mit einem serienmäßigen ACC-System durchgeführt. Das vorgestellte Konzept zur Erzeugung der Kennlinie ermöglichte eine direkte und intuitive Beeinflussung des Reglerverhaltens.

4.1.2 Prinzip der Sliding-Mode-Regelung

Sliding-Mode-Regler gehören zur Klasse der strukturvariablen Regelungen (*structure variable control*, SVC). Wesentlicher Bestandteil einer *Sliding-Mode*-Regelung ist das Umschalten der Reglerstruktur, wodurch der Regelstrecke eine definierte Dynamik aufgeprägt wird (Edwards und Spurgeon 1998; Hebisch 1995; Utkin 1981). Folgen die Systemzustände der vorgegebenen Dynamik, befindet sich das System in einem sogenannten Gleitzustand, der sich durch Robustheit gegenüber Störungen und Modellunsicherheiten auszeichnet.

Im Folgenden werden die Funktionsweise und die unterschiedlichen Phasen einer idealen *Sliding-Mode*-Regelung beispielhaft dargestellt. Da die Voraussetzungen für eine ideale *Sliding-Mode*-Regelung bei realen Systemen nicht erfüllt sind, werden Modifikationen des Regelungsprinzips vorgestellt. Als Beispiel wird ein System mit doppelt integrierendem Verhalten gewählt, dessen Struktur sich für die weiterführende Behandlung der in den Abschnitten 4.2 bis 4.4 dargestellten Längs- und Querregelung eines Fahrzeugs eignet.

Motivation und einführendes Beispiel

Als Beispielsystem sei das rein integrierende System zweiter Ordnung

$$\ddot{\xi}(t) = u(t) \quad (4.1)$$

mit $u(t)$ als Eingangssignal und dem Ausgangssignal $\xi(t)$ gegeben. Durch zweifache Integration der Differentialgleichung ergibt sich die allgemeine Lösung für beliebige Eingangssignale

$$\xi(t) = \iint u(\tau) d\tau + \dot{\xi}_0 \cdot t + \xi_0 \quad (4.2)$$

mit den Anfangsbedingungen $\dot{\xi}_0 = \dot{\xi}(t=0)$ und $\xi_0 = \xi(t=0)$. Für konstante Eingangssignale erhält man die Gleichungen

$$\ddot{\xi}(t) \equiv u_{\text{const}} = \text{const} \quad (4.3)$$

$$\dot{\xi}(t) = u_{\text{const}} t + \dot{\xi}_0 \quad (4.4)$$

$$\xi(t) = \frac{1}{2} u_{\text{const}} t^2 + \dot{\xi}_0 t + \xi_0. \quad (4.5)$$

$\xi(t)$ und $\dot{\xi}(t)$ stellen dabei Zustandsgrößen dar, die die Ausgangsgröße bzw. die Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsgröße beschreiben. Anhand der Gleichungen (4.3) bis (4.5) ist ersichtlich, dass eine konstante Eingangsgröße zu einer linearen Änderungsgeschwindigkeit $\dot{\xi}$ und letztendlich zu einer quadratischen Änderung des Zustands ξ führt.

Zur Untersuchung des Systemverhaltens wird auf eine Darstellung in der durch ξ und $\dot{\xi}$ aufgespannten Phasenebene zurückgegriffen. Durch Umformungen der Gleichungen (4.4) und (4.5) lässt sich die Änderungsgeschwindigkeit $\dot{\xi}$ in Abhängigkeit vom Systemzustand ξ durch

$$\dot{\xi}(\xi) = \pm \sqrt{2u_{\text{const}}(\xi - \xi_0) + \dot{\xi}_0^2} \quad (4.6)$$

ausdrücken. Mit Gleichung (4.6) lassen sich für unterschiedliche Anfangsbedingungen Trajektorien in der Phasenebene bestimmen, die abhängig von der gewählten Eingangsgröße einen charakteristischen Verlauf aufweisen. Abbildung 4.3 zeigt beispielhaft Trajektorien für verschwindende, konstant positive und konstant negative Eingangssignale:

- Werden *verschwindende* Eingangssignale $u_{\text{const}} = 0$ vorausgesetzt, ergeben sich die in Abbildung 4.3(a) eingezeichneten Trajektorien. Nach Gleichung (4.6) hängt die Änderung der Zustandsgröße ξ in diesem Fall ausschließlich vom Anfangswert der Zustandsgröße $\dot{\xi}$ ab. Bei Anfangswerten ungleich Null ergeben sich Trajektorien, die parallel zur ξ -Achse verlaufen. Für Anfangswerte von $\dot{\xi} = 0$ besitzt das System stationäre Zustände, die sich im Phasendiagramm auf der ξ -Achse befinden.
- Für *konstant positive* Eingangssignale erhält man die in Abbildung 4.3(b) dargestellten, nach rechts geöffneten Parabeln als Trajektorien. Diese werden von unten nach oben durchlaufen.
- *Konstant negative* Eingangssignale führen zu den in Abbildung 4.3(c) dargestellten, nach links geöffneten Parabeln, die von oben nach unten durchlaufen werden.

Da die Zeit in Gleichung (4.6) nicht explizit auftritt, fällt es schwer, aus den Diagrammen in Abbildung 4.3 auf das zeitliche Verhalten der Zustandsänderungen zu schließen. Eine Einschätzung gelingt durch die zeitlich äquidistante Markierung³¹ der Trajektorien, wobei die Markierungen umso enger aufeinander folgen, je langsamer die Bewegung ist.

³¹Hier durch Pfeile

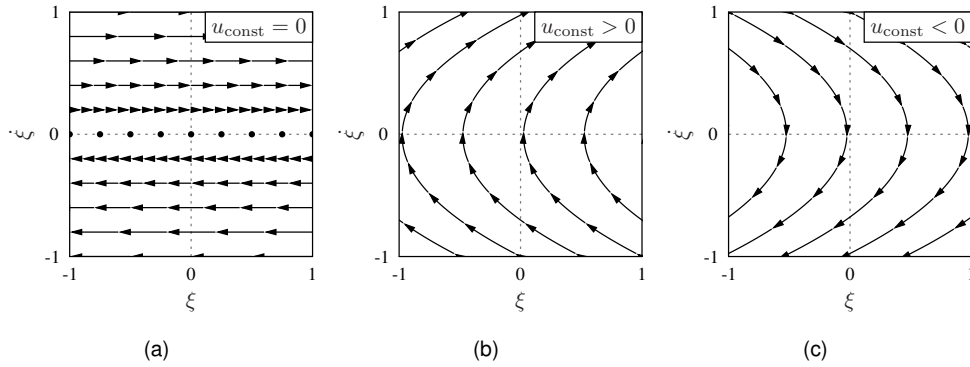


Abbildung 4.3: Systemtrajektorien eines doppelt integrierenden Systems für (a) verschwindende, (b) konstant positive und (c) konstant negative Eingangssignale.

Anmerkung Werden die bisher untersuchten Zusammenhänge auf ein bewegtes mechanisches System übertragen, entspricht die Zustandsgröße ξ einer Position, $\dot{\xi}$ einer Geschwindigkeit und die Eingangsgröße u einer Beschleunigung. Trajektorien, die einer Bewegung des mechanischen Systems entsprechen, werden in dieser Arbeit als Systemtrajektorien bezeichnet.

Ideale *Sliding-Mode*-Regelung des Beispielsystems

Die vorangegangenen Betrachtungen des Beispielsystems (4.1) in der Phasenebene dienen als Grundlage für den Entwurf einer *Sliding-Mode*-Regelung. Das Ziel der Regelung sei die Überführung des Systems in einen stationären Soll-Zustand mit $\xi_{\text{soll}} = 0$ und $\dot{\xi}_{\text{soll}} = 0$. Um dieses Ziel zu erreichen, wird auf geeignete Weise zwischen konstant positiven bzw. konstant negativen Stellsignalen gleichen Betrags umgeschaltet. Der Systemzustand verändert sich demnach stückweise entsprechend den in Abbildung 4.3(b) bzw. 4.3(c) dargestellten Trajektorien. Das Umschalten erfolgt im einfachsten Fall anhand einer Schaltgeraden, die den Phasenraum in einen Bereich oberhalb und unterhalb dieser Geraden unterteilt. Wie in Abbildung 4.4(a) veranschaulicht, werden die in diesen Bereichen erzeugten Stellsignale derart gewählt, dass das System von beiden Seiten entlang der Trajektorien für konstante Eingangssignale in Richtung der Schaltgeraden geführt wird. Neben den explizit dargestellten schwarzen Beispieltrajektorien ist mit grauen Pfeilen ein Richtungsfeld eingezeichnet, das die Systembewegung für unterschiedliche Anfangswerte veranschaulicht. Anhand des Richtungsfelds kann das Systemverhalten für unterschiedliche Bereiche im Phasenraum qualitativ abgeschätzt werden.

Abbildung 4.4(b) zeigt den Verlauf der Systemtrajektorie des Systems (4.1) unter dem Einfluss der beschriebenen Regelung. Ausgehend vom Anfangszustand $(\xi_0, \dot{\xi}_0)$ wird zunächst $u(t) \equiv u^-$ als Stellsignal gewählt. Dies führt zu einer Annäherung an die Schaltgerade (*reaching mode*). Überschreitet der Systemzustand die Schaltgerade, wird die Struktur des Reglers umgeschaltet und es liegt $u(t) \equiv u^+$ als Stellsignal an. Dadurch wird der

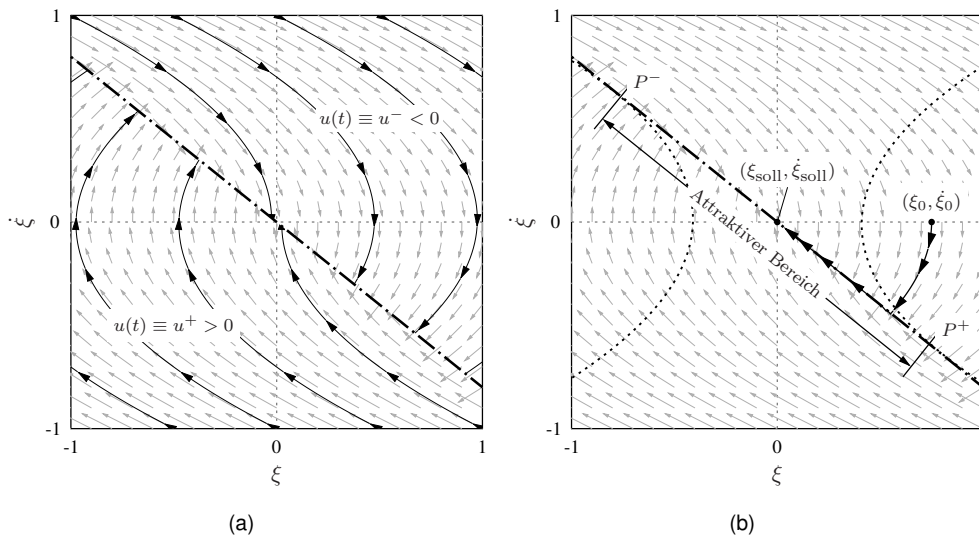


Abbildung 4.4: *Sliding-Mode-Regelung* für ein Doppelintegratorsystem: (a) Einführung einer Schaltgeraden mit unterschiedlichen Reglerstrukturen oberhalb und unterhalb der Gerade, (b) Beispiel eines Regelvorgangs und Darstellung des attraktiven Bereichs auf der Schaltgeraden, für den ein Gleitzustand eintritt.

Systemzustand zurück in Richtung der Schaltgeraden geführt, wo es erneut zu einem Umschalten kommt. Für den idealen Fall unendlich kurzer Schaltzeiten verlässt der Systemzustand die Schaltgerade nicht mehr, sondern strebt dem stationären Endzustand $(\xi_{soll}, \dot{\xi}_{soll})$ entgegen. Die Bewegung auf der Schaltgeraden, ohne dass der Systemzustand diese verlässt, wird Gleitzustand (*sliding mode*) genannt. Es ist hervorzuheben, dass die Dynamik im Gleitzustand ausschließlich durch die Schaltgerade vorgegeben ist. Durch das schaltende Regelgesetz wird eine Systembewegung erzielt, die in keiner der beiden Reglerstrukturen enthalten ist. Für den vorliegenden Fall wird dem System ein Verhalten aufgeprägt, das sich durch einen linearen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Abstand auszeichnet. Wie später gezeigt wird, lässt sich dieses Verhalten durch eine lineare Differentialgleichung erster Ordnung beschreiben, wodurch sich exponentielle Einschwingvorgänge ergeben.

Die Voraussetzungen für das Zustandekommen eines Gleitzustands werden ebenfalls in Abbildung 4.4(b) veranschaulicht. Abhängig von der gewählten Steigung der Schaltgeraden und den Reglerausgangsgrößen u^+ bzw. u^- ergeben sich die unterbrochen dargestellten Parabeln, die tangential an der Schaltgeraden anliegen. In den Berührungspunkten P^- bzw. P^+ stimmt die Geradensteigung mit der Steigung der entsprechenden Parabel überein. Führt die Bewegung des Systemzustands zu einer Trajektorie, die in einem dieser Punkte die Schaltgerade erreicht, erfolgt die weitere Bewegung nach dem Umschalten der Struktur in Richtung der Geraden. Für den Fall, dass der Systemzustand zwischen P^- und P^+ auf die Schaltgerade trifft, ist die Steigung der Systemtrajektorie nach dem Umschal-

ten der Reglerstruktur steiler als die Geradensteigung. Der Systemzustand wird demnach stärker in Richtung der Schaltgeraden geführt als in den Tangentialpunkten, so dass von beiden Seiten Trajektorien auf der Geraden enden. In diesem Bereich tritt ein Gleitzustand der Systembewegung ein. Die Schaltgerade wird zwischen P^- und P^+ als attraktiv bezeichnet. Außerhalb des attraktiven Bereichs sind die Systemtrajektorien weniger steil als die Geradensteigung, so dass die Schaltgerade verlassen wird und zunächst kein Gleitzustand eintritt.

Reale *Sliding-Mode*-Regelung des Beispielsystems

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde ein ideales Stellglied mit verschwindenden Schaltzeiten angenommen. Dies ermöglichte eine exakte Führung des Systemzustands entlang der Schaltgeraden. Reale Stellglieder weisen jedoch einen zeitlichen Verzug bei der Umsetzung der Stellsignale auf. Bei der Umschaltung der Reglerstrukturen kommt es dadurch zu Abweichungen des Systemzustands von der Schaltgeraden. Diese Abweichungen führen zu einem meist hochfrequenten Umschalten des Stellsignals, das auch als „Rattern“ (*chattering*) bezeichnet wird (z. B. Jezernik 1995). In Abbildung 4.5(a) ist neben der Systemtrajektorie im Phasenraum der zeitliche Verlauf der Stellgröße dargestellt. Während der Annäherung an die Schaltgerade wird bis zum Zeitpunkt T_{reach} ein konstant negatives Stellsignal aufgeschaltet. Nach Erreichen der Schaltgeraden kommt es durch die beschriebene Latenz bei der Umsetzung des Stellsignals zu leichten Abweichungen des Systemzustands von der Schaltgeraden. Dies wiederum führt zu einem schnellen Schalten der Stellgröße.

Das veranschaulichte Reglerverhalten stellt eine starke Beanspruchung des Stellglieds dar. Weiterhin resultiert aus der großen Stellaktivität ein erhöhter Energiebedarf. Eine Möglichkeit das häufige Umschalten der Reglerstruktur zu vermeiden, besteht in der Modifikation des Regelgesetzes, das den Systemzustand auf die Schaltgerade führt. Wird das bisherige unstetige Umschalten durch einen stetigen Übergang zwischen der positiven und negativen Stellgröße ersetzt, ergibt sich das in Abbildung 4.5(b) gezeigte Verhalten. Durch das modifizierte Regelgesetz entsteht eine Grenzschicht um die Schaltgerade, in der für den dargestellten Fall ein linearer Übergang vom negativen zum positiven Stellsignal erfolgt. Das zuvor beobachtete Rattern wird vollständig unterdrückt (z. B. Monsees 2002). Neben den positiven Auswirkungen dieser Maßnahme auf den Stellsignalverlauf ist allerdings festzustellen, dass der Systemzustand zwar innerhalb der Grenzschicht verbleibt, die durch die Schaltgerade vorgegebene Dynamik jedoch nicht exakt umgesetzt wird. Dieser Zustand wird pseudo- oder quasi-*sliding-mode* genannt.

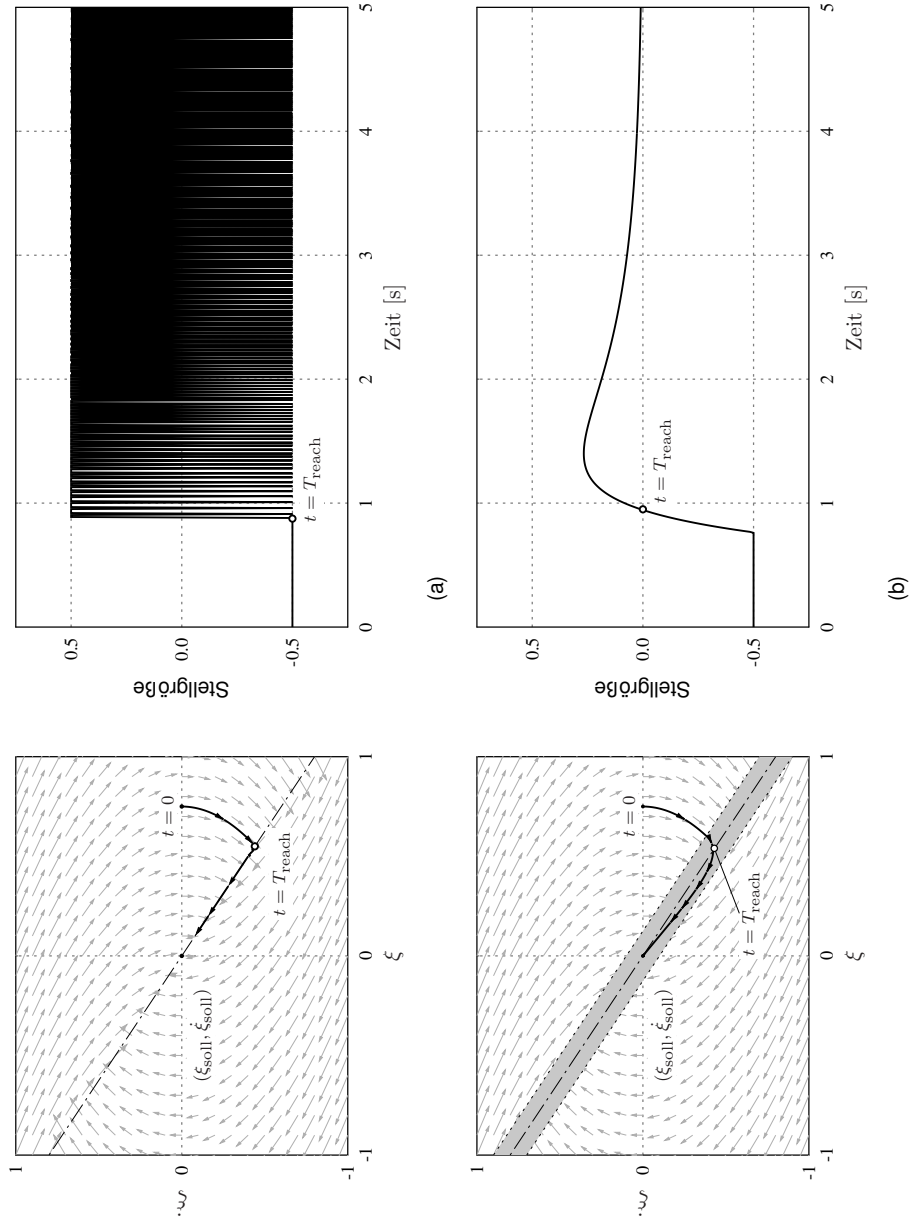


Abbildung 4.5: Systemtrajektorie und Stellgrößenverlauf einer *Sliding-Mode*-Regelung mit (a) unstetigem Regelgesetz und (b) stetigem Regelgesetz durch Einführung einer Grenzschicht um die Schaltgerade.

Formale Definition einer *Sliding-Mode*-Regelung

Nach den vorangegangenen beispielhaften Überlegungen wird im folgenden Abschnitt die *Sliding-Mode*-Regelung für ein allgemeines System mit der Zustandsraumdarstellung

$$\dot{\xi} = \mathbf{A}(\xi, t) \xi + \mathbf{B}(\xi, t) \mathbf{u} \quad (4.7)$$

formal definiert. Dabei ist $\xi \in \mathbb{R}^n$ der Zustandsvektor und $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ der Eingangsvektor. Weiterhin bezeichnet $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ die Systemmatrix und $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ die Eingangsmatrix des Systems.

Der Entwurf einer *Sliding-Mode*-Regelung für das System (4.7) erfolgt in zwei Schritten (Perruquetti und Barbot 2002; Edwards und Spurgeon 1998; Jezernik 1995):

1. *Vorgabe des Gleitzustands (sliding mode)*: Es müssen m Schaltfunktionen

$$\mathbf{s}(\xi) = [s_1(\xi), \dots, s_m(\xi)]^T$$

mit $s_i(\xi) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ für $i = 1, \dots, m$ bestimmt werden, anhand derer die gewünschte Systemdynamik vorgegeben wird. Wird die Regelung so ausgelegt, dass die Bedingung $\mathbf{s}(\xi) = \mathbf{0}$ erfüllt ist, ergeben sich Schalthyperflächen³², auf denen sich der Systemzustand im Idealfall bewegt. Die Schnittmenge der Schaltflächen wird als Schaltmannigfaltigkeit

$$\mathbf{S} = \{\xi \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{s}(\xi) = \mathbf{0}\} \quad (4.8)$$

oder auch als finale Schaltfläche bezeichnet. Ist die Bewegung des Systemzustands auf \mathbf{S} beschränkt, wird die resultierende Systemdynamik im Gleitzustand vollständig durch die Wahl der Schaltfunktionen vorgegeben. Die Schaltmannigfaltigkeit ist demnach so zu gestalten, dass das gewünschte Systemverhalten auftritt. Es ist insbesondere darauf zu achten, dass die Bewegung im Gleitzustand zu einer stabilen Dynamik führt, der Systemzustand also einem stationären Punkt im Zustandsraum entgegenstrebt.

2. *Bestimmung eines Regelgesetzes (reaching mode)*: Durch das Regelgesetz wird ein Eingangsvektor

$$\mathbf{u}(\xi, t) = [u_1(\xi, t), \dots, u_m(\xi, t)]^T$$

erzeugt, dessen Komponenten

$$u_i(\xi, t) = \begin{cases} u_i^+(\xi, t) & , \text{ für } s_i(\xi) < 0 \\ u_i^-(\xi, t) & , \text{ für } s_i(\xi) > 0 \end{cases} \quad i = 1, \dots, m$$

das Umschalten zwischen den Reglerstrukturen u_i^- und u_i^+ beschreiben. Für jede Komponente u_i wird dazu die Lage des Systemzustands ξ bezüglich der Schaltfläche s_i betrachtet. Ein geeignetes Regelgesetz führt den Systemzustand in Richtung der Schaltflächen und beschränkt die Systembewegung nach Erreichen der finalen

³²Vereinfachend im Folgenden auch als Schaltflächen bezeichnet

Schaltfläche auf genau diese. Es wird also gefordert, dass ein Gleitzustand auftritt und dieser ausgehend von beliebigen Anfangszuständen erreicht wird. Beide Forderungen können für ein gewähltes Regelgesetz mit Hilfe eines Ljapunov-Ansatzes untersucht werden. Nach Gleichung (4.8) befindet sich der Systemzustand für $s(\xi) \neq 0$ nicht auf allen Schaltflächen. Wird für einen solchen Fall die Kandidatenfunktion

$$V(s(\xi)) = \frac{1}{2} s^T(\xi) s(\xi) \quad (4.9)$$

betrachtet, kann die hinreichende Bedingung

$$\dot{V}(s(\xi)) = s^T(\xi) \dot{s}(\xi) < 0 \quad (4.10)$$

für das Auftreten eines Gleitzustands und für die Attraktivität der Schaltflächen aufgestellt werden. Gleichung (4.10) wird als Erreichbarkeitsbedingung (*reaching condition*) bezeichnet und besagt, dass Abweichungen von den Schaltflächen im zeitlichen Verlauf ($t \rightarrow \infty$) beschränkt sind.

Zu 1. Da die Systemdynamik unter dem Einfluss eines passenden Regelgesetzes ausschließlich von der Vorgabe der Schaltfunktionen abhängt, ist das geregelte System während des Gleitvorgangs invariant gegenüber Parameterschwankungen und Modellunsicherheiten. Neben dieser Robustheit ergibt sich ein weiterer Vorteil, indem die erzwungene Bewegung auf der Schaltmannigfaltigkeit gegenüber der unregelmäßigen Systembewegung meist eine geringere Ordnung aufweist. So muss die geregelte Bewegung Gleichung (4.7) genügen und Teil der Menge (4.8) sein, wodurch sich eine reduzierte Anzahl an Freiheitsgraden ergibt.

Zu 2. Für die Wahl des Regelgesetzes sind in der Literatur unterschiedliche Ansätze untersucht worden (Perruquetti und Barbot 2002; Edwards und Spurgeon 1998; Scheeche 1997). Die für die vorliegende Arbeit relevanten Regelgesetze werden im Folgenden beschrieben.

- *Relais-Regelung*: Die Relais-Regelung wurde bereits bei der Beschreibung der idealen *Sliding-Mode*-Regelung des Beispielsystems verwendet. Unter der Annahme sehr kurzer Schaltzeiten des Stellglieds findet ein hartes Umschalten der Reglerstruktur beim Überqueren der Schaltfunktionen statt. Für Systeme mit nur einer Stellgröße ergibt sich das Schaltgesetz

$$u(t) = \begin{cases} u^+ & , \text{ für } s(\xi) < 0 \\ u^- & , \text{ für } s(\xi) > 0 \end{cases}$$

mit den konstanten Reglerausgangsgrößen u^- und u^+ . Die resultierende Kennlinie für das Umschalten in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schaltfläche $s(\mathbf{x})$ ist in Abbildung 4.6(a) dargestellt.

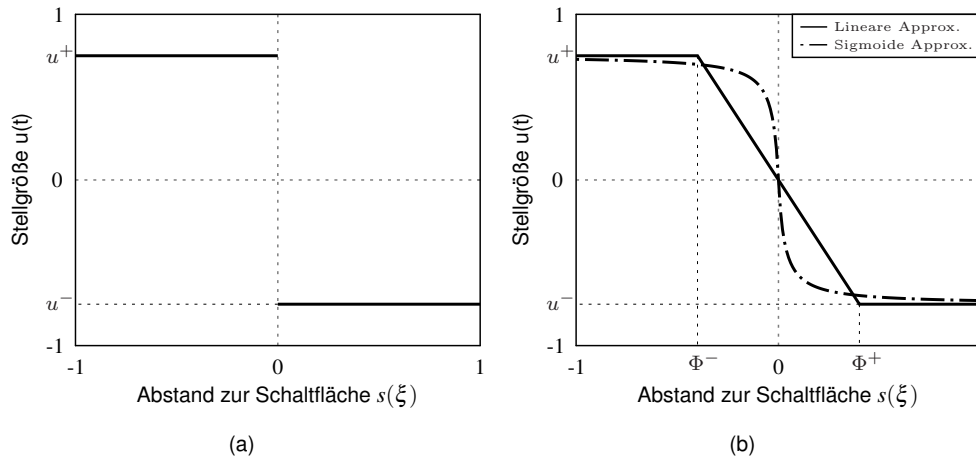


Abbildung 4.6: Kennlinie einer (a) Relais-Regelung und (b) kontinuierliche Approximationen.

- *Kontinuierliche Approximation der Relais-Regelung:* Um ein hochfrequentes Stellsignal im Verlauf der Regelung zu vermeiden, kann das diskontinuierliche Umschalten bei der Relais-Regelung durch einen kontinuierlichen Übergang zwischen der positiven und negativen Stellgröße ersetzt werden. Im einfachsten Fall wird ein linearer Übergang

$$u(t) = \begin{cases} u^+ & , \text{für } s(\xi) < \Phi^- \\ u^+ \cdot s(\xi) / \Phi^- & , \text{für } \Phi^- \leq s(\xi) < 0 \\ u^- \cdot s(\xi) / \Phi^+ & , \text{für } 0 \leq s(\xi) < \Phi^+ \\ u^- & , \text{für } \Phi^+ \leq s(\xi) \end{cases}$$

mit der Grenzschichtbreite $\Phi^+ > 0$ oberhalb und $\Phi^- < 0$ unterhalb der Schaltkurve eingesetzt. Eine für $u^+ = u^-$ stetig differenzierbare Annäherung erhält man beispielsweise durch die sigmoide Funktion

$$u(t) = \begin{cases} u^+ \cdot \frac{|s(\xi)|}{|s(\xi)| + \zeta} & , \text{für } s(\xi) < 0 \\ u^- \cdot \frac{|s(\xi)|}{|s(\xi)| + \zeta} & , \text{für } s(\xi) > 0 \end{cases}$$

mit dem Parameter ζ . Wie bereits bei der Regelung des Beispielsystems beobachtet, kann für die kontinuierliche Approximation des Schaltgesetzes lediglich ein *pseudo-sliding-mode* gewährleistet werden. Hierbei befindet sich der Systemzustand in der Nähe, jedoch nicht exakt auf der Schaltfläche. Damit wird die durch die Schaltmanigfaltigkeit vorgegebene Dynamik lediglich angenähert.

- *Äquivalente Regelung:* Bei der äquivalenten Regelung wird das Stellsignal nach

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_{\Leftrightarrow}(t) + \mathbf{u}_d(t)$$

in einen kontinuierlichen Teil $\mathbf{u}_{\Leftrightarrow}(t)$ und einen diskontinuierlichen Teil $\mathbf{u}_d(t)$ aufgespalten. Der kontinuierliche Anteil entspricht dabei dem Stellsignal, das unter idealen

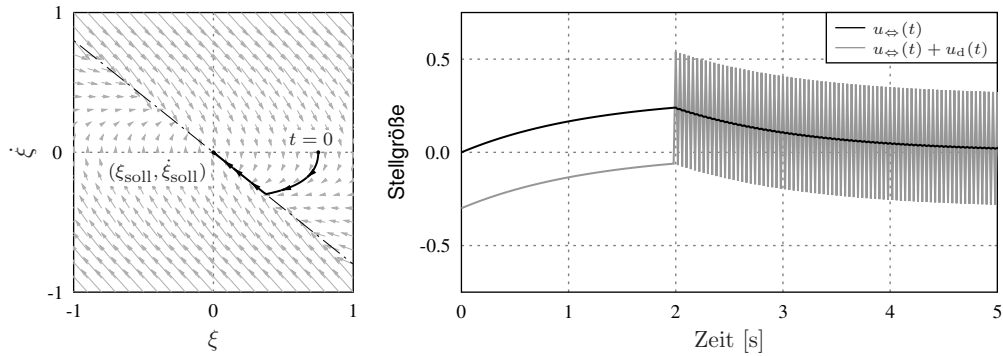


Abbildung 4.7: Systemtrajektorie und zeitlicher Verlauf der Stellgröße für einen *Sliding-Mode*-Ansatz mit äquivalenter Regelung.

Bedingungen ohne Störungen, Messunsicherheiten und Stellgliedfehler aufgeschaltet werden muss, damit der Systemzustand der vorgegebenen Dynamik folgt.³³ Da die Schaltflächen in diesem Fall nicht verlassen werden, gilt $s(\xi) = \mathbf{0}$ (vgl. Gleichung (4.8)) und damit auch

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{s}(\xi)) = \dot{\mathbf{s}}(\xi) \dot{\xi} = \mathbf{0}.$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich unter Berücksichtigung der Systemdynamik (4.7)

$$\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \xi} \mathbf{A}(\xi, t) \dot{\xi} + \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} \mathbf{B}(\xi, t) \mathbf{u}_{\leftrightarrow}(t) = \mathbf{0}.$$

Der kontinuierliche Anteil der Regelung kann dann durch

$$\mathbf{u}_{\leftrightarrow}(t) = - \left[\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \xi} \mathbf{B}(\xi, t) \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \xi} \mathbf{A}(\xi, t) \dot{\xi} \quad (4.11)$$

beschrieben werden. Der diskontinuierliche Anteil $\mathbf{u}_d(t)$ wird benötigt, um den Systemzustand in Richtung der Schaltflächen zu bewegen und im darauffolgenden Gleitzustand die bereits genannten Robustheitseigenschaften bezüglich Störungen bzw. Mess- und Modellungenauigkeiten zu gewährleisten. Durch die Aufschaltung des äquivalenten Signalanteils kann die Verstärkung gegenüber der rein diskontinuierlichen Regelung reduziert werden. Für das Beispielsystem (4.2) ist dieses Vorgehen in Abbildung 4.7 dargestellt. In der Phasenraumdarstellung wird anhand der Systemtrajektorie und dem abgebildeten Richtungsfeld eine frühzeitigere Ausrichtung in Richtung der Schaltgeraden als bei der Relais-Regelung (vgl. Abbildung 4.4(b)) deutlich. Der zeitliche Verlauf des Stellsignals $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_{\leftrightarrow}(t) + \mathbf{u}_d(t)$ ist auf der rechten Seite von Abbildung 4.7 grau dargestellt. Nach Erreichen der Schaltgeraden entspricht der schwarz eingezeichnete Stellsignalanteil $\mathbf{u}_{\leftrightarrow}(t)$ einer Mittelung des diskontinuierlichen Gesamtstellsignals.

³³Der kontinuierliche Anteil kann auch als gefiltertes Stellsignal einer Relais-Regelung angesehen werden.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde der Entwurf einer *Sliding-Mode*-Regelung beispielhaft beschrieben und für den allgemeinen Fall formal definiert. Darauf aufbauend werden in den folgenden Abschnitten *Sliding-Mode*-Regler für die automatisierte Fahrzeugführung in Längs- und Querrichtung entworfen.

4.2 Längsregelung

Das in diesem Abschnitt zu entwerfende Längsführungssystem orientiert sich an der Richtlinie³⁴ ISO 15622 (Internationale Organisation für Normung 2002). Die Richtlinie umfasst unter anderem Empfehlungen bezüglich der Auslegung und des Funktionsumfangs einer Abstandsregelung, der Gestaltung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie der Bewertung von ACC-Systemen anhand von Testprozeduren. Die Längsführung besteht aus der Geschwindigkeitsregelung bei freier Fahrt und der Abstandsregelung bei durch ein langsamerer Vorderfahrzeug gestörter Fahrt. Die Geschwindigkeitsregelung wurde bereits in Abschnitt 4.1.1 behandelt. Für die Aufgabe der automatisierten Abstandsregelung wird im Folgenden ein Regelungssystem basierend auf der in Abschnitt 4.1.2 erläuterten *Sliding-Mode*-Regelung entworfen.

In Abschnitt 4.2.1 werden Vorüberlegungen bezüglich der Regelungsaufgabe angestellt und Anforderungen spezifiziert.

Für die Auslegung eines geeigneten *Sliding-Mode*-Reglers erfolgt in Abschnitt 4.2.2 die Vorgabe einer Schaltfunktion, die zu dem gewünschten Systemverhalten führt.

Um das Reglerverhalten an unterschiedliche Verkehrssituationen anpassen zu können, wird in Abschnitt 4.2.3 ein Regelgesetz eingeführt, mit dem sich das Reglerverhalten auf intuitive Weise vorgeben lässt.

Die durch die Vorgabe der Schaltfunktion und des Regelgesetzes entstandenen Freiheitsgrade werden in Abschnitt 4.2.4 für beispielhafte Fahrsituationen untersucht. Das Systemverhalten für unterschiedliche Parametrierungen wird anhand von Simulationen veranschaulicht.

4.2.1 Überlegungen zur Abstandsregelung

Anforderungen

Wird ein langsamerer Fahrzeug im Fahrweg des geregelten Fahrzeugs erkannt, soll durch die Abstandsregelung ein vom Fahrer einstellbarer Sicherheitsabstand eingehalten werden. Es ist zweckmäßig, diesen Wunschabstand als geschwindigkeitsabhängige Größe

³⁴Eine Richtlinie besitzt bindenden Charakter, ist jedoch keine gesetzliche Vorschrift.

anzugeben. Dazu wird der Begriff der Zeitlücke

$$t_L = \frac{\Delta x}{\dot{x}_{\text{Obj}}}$$

eingeführt, mit Δx als Abstand zum Vorderfahrzeug und \dot{x}_{Obj} als Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs. Das vorgestellte System erlaubt dem Fahrer eine Zeitlückeneinstellung von $t_{L,\text{soll}} = 1,0 \dots 3,6$ s. Auch die kleinste Zeitlückenstufe von 1 s ist dabei konform zur Richtlinie ISO 15622.³⁵ Aus der eingestellten Zeitlücke ergibt sich der Soll-Abstand nach

$$\Delta x_{\text{soll}} = t_{L,\text{soll}} \dot{x}_{\text{Obj}}.$$

Für eine stationäre Folgefahrt im gewünschten Abstand wird weiterhin eine Relativgeschwindigkeit von $\Delta \dot{x}_{\text{soll}} = 0$ m/s gefordert.

Neben der Vorgabe des Soll-Zustands $(\Delta x_{\text{soll}}, \Delta \dot{x}_{\text{soll}})$ werden insbesondere Anforderungen an das dynamische Verhalten der Abstandsregelung gestellt. So soll das System in kritischen Verkehrssituationen direkt und mit starken Eingriffen reagieren, in unkritischen Situationen hingegen soll der Zielzustand komfortabel eingeregelt werden. Die Bewertung der Kritikalität einer Situation erfolgt in dieser Arbeit anhand der Stellgröße, die erzeugt werden muss, um das Regelziel zu erreichen. Liegt diese Stellgröße im Bereich der maximal dem System zur Verfügung stehenden Verzögerung, wird die Situation als kritisch bewertet. Schwerer als die Bewertung der Kritikalität fällt die Definition des Komfortbegriffs. Allgemein sind unangemessen starke Beschleunigungen und Rucke zu vermeiden. Die konkrete Abstimmung der Regelung in Hinblick auf ein komfortables Verhalten erfolgte in dieser Arbeit anhand von simulierten und realen Fahrversuchen.

Anwendung der *Sliding-Mode-Regelung*

Für die *Sliding-Mode-Abstandsregelung* ergibt sich ein Phasenraum, der durch den Abstand Δx und die Relativgeschwindigkeit $\Delta \dot{x}$ aufgespannt wird. Im Hinblick auf eine intuitive Darstellungsweise in späteren Abschnitten werden diese beiden Relativgrößen in der vorliegenden Arbeit durch

$$\Delta x = x_{\text{Ego}} - x_{\text{Obj}} \quad (4.12)$$

$$\Delta \dot{x} = \dot{x}_{\text{Ego}} - \dot{x}_{\text{Obj}} \quad (4.13)$$

definiert, mit x_{Ego} und \dot{x}_{Ego} als Position und Geschwindigkeit des geregelten Fahrzeugs bzw. x_{Obj} und \dot{x}_{Obj} als Position und Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs.³⁶ Als Eingangsgröße dient die relative Beschleunigung

$$\Delta \ddot{x} = \ddot{x}_{\text{Ego}} - \ddot{x}_{\text{Obj}} \quad (4.14)$$

³⁵Laut Bußgeldkatalog-Verordnung (Stand: 01.08.2007) wird ein Bußgeld ab einer Unterschreitung der Hälfte des halben Tachowerts in Metern verordnet. Dies entspricht einer Zeitlücke von 0,9 s.

³⁶Für Formeln und Grafiken bedeutet dies negative Abstände für Annäherungen des geregelten Fahrzeugs an ein Vorderfahrzeug. Im Textteil ist unter dem Abstand der Betrag dieses Wertes zu verstehen.

mit der Beschleunigung des geregelten Fahrzeugs \ddot{x}_{Ego} und der Beschleunigung des Vorderfahrzeugs \ddot{x}_{Obj} . Zur Vereinfachung des Reglerentwurfs wird die Beschleunigung des Vorderfahrzeugs als Störgröße betrachtet und für die Untersuchungen in diesem Abschnitt als verschwindend angenommen, d. h. es werden Manöver bezüglich eines Vorderfahrzeugs mit konstanter Geschwindigkeit betrachtet.

Durch die Gleichungen (4.12) bis (4.14) wird ein System beschrieben, das strukturell dem Beispielsystem (4.1) entspricht, also einem doppelten Integrator mit der Zustandsraumdarstellung

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta \ddot{x}_{\text{soll}}.$$

Das in Abschnitt 3.2 modellierte dynamische Verhalten bei der Umsetzung einer angeforderten Soll-Beschleunigung ist im Hinblick auf die Anwendung zur Abstandsregelung schwach ausgeprägt und wird hierbei nicht berücksichtigt. Dies entspricht der Annahme, dass die Soll-Beschleunigung direkt in eine Ist-Beschleunigung umgesetzt wird. Der weitere Reglerentwurf erfolgt anhand dieses vereinfachten Modells mit reduzierter Systemordnung. Um sicherzustellen, dass dabei keine wesentlichen Effekte vernachlässigt werden, kommt für alle Simulationen das vollständige Simulationsmodell aus Abschnitt 3.2 mit Berücksichtigung der Aktordynamik und des maximalen Beschleunigungsvermögens zum Einsatz.

4.2.2 Auslegung des Gleitzustands (längs)

Lineare Schaltfunktion

Als Ansatz zur Vorgabe des Gleitzustands wird zunächst eine lineare Schaltfunktion

$$s_{\text{längs}}(\Delta x, \Delta \dot{x}) = m_{\text{längs}}(\Delta x - \Delta x_{\text{soll}}) - \Delta \dot{x} \quad (4.15)$$

betrachtet, die zu einer Schaltgeraden mit der Steigung $m_{\text{längs}}$ und einer Nullstelle im Wunschabstand Δx_{soll} führt. Bewegt sich der Systemzustand auf der Schaltgeraden, dann gilt $s_{\text{längs}}(\Delta x, \Delta \dot{x}) = 0$. Damit ergibt sich aus Gleichung (4.15) die inhomogene Differentialgleichung

$$m_{\text{längs}}\Delta x - \Delta \dot{x} = m_{\text{längs}}\Delta x_{\text{soll}}. \quad (4.16)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung setzt sich aus der Lösung der zugehörigen homogenen Differentialgleichung sowie einer partikulären Lösung³⁷ zusammen (Forst und Hoffmann 2005). Für den homogenen Fall erhält man mit einem e^{λ} -Ansatz die allgemeine Lösung

$$\Delta x_{\text{h}}(t) = c e^{m_{\text{längs}} t}, \quad c \in \mathbb{R}. \quad (4.17)$$

Da Gleichung (4.16) eine konstante rechte Seite aufweist, ist eine partikuläre Lösung mit

$$\Delta x_{\text{p}}(t) \equiv \Delta x_{\text{soll}} \quad (4.18)$$

³⁷ Als partikuläre Lösung wird eine einzelne Funktion aus der Schar der Lösungsfunktionen bezeichnet.

direkt anzugeben. Aus der Überlagerung der Lösung der homogenen Differentialgleichung (4.17) und der partikulären Lösung (4.18) ergibt sich

$$\begin{aligned}\Delta x(t) &= \Delta x_h(t) + \Delta x_p(t) \\ &= c e^{m_{\text{l\"angs}} t} + \Delta x_{\text{soll}}.\end{aligned}\quad (4.19)$$

Zur Bestimmung der Konstante c wird die Anfangsbedingung $\Delta x(0) = \Delta x_0$ in Gleichung (4.19) eingesetzt und man erhält

$$\Delta x(t) = (\Delta x_0 - \Delta x_{\text{soll}}) e^{m_{\text{l\"angs}} t} + \Delta x_{\text{soll}} \quad (4.20)$$

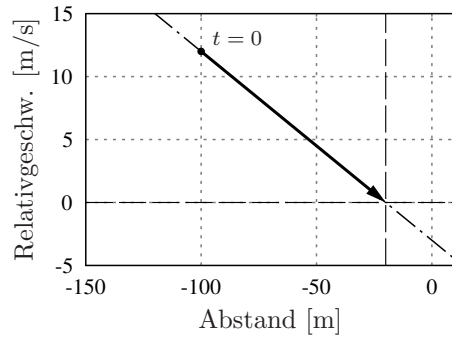
als Lösung der Differentialgleichung (4.16).

Gleichung (4.20) beschreibt den zeitlichen Verlauf des Abstands zum Vorderfahrzeug für den Fall, dass sich der Systemzustand auf der vorgegebenen Schaltgeraden bewegt. Gilt $m_{\text{l\"angs}} < 0$, weist das System ein stabiles Verhalten auf, bei dem der Abstand asymptotisch gegen den Wunschabstand Δx_{soll} strebt. Die Relativgeschwindigkeit und die zur Umsetzung des Manövers benötigte Beschleunigung ergeben sich durch sukzessive Differentiation der Gleichung (4.20). Der Verlauf der Zustandsgrößen ist dementsprechend ebenfalls asymptotisch.

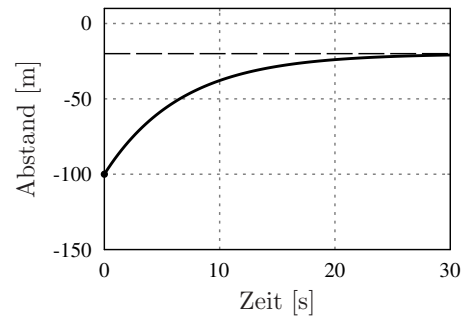
In Abbildung 4.8 sind die Systembewegung entlang einer Schaltgeraden sowie die entsprechenden zeitlichen Verläufe der Zustandsgrößen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine lineare Systemtrajektorie im Phasenraum einem asymptotischen zeitlichen Verlauf der Zustandsgrößen entspricht. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die in Abbildung 4.8(d) dargestellte Beschleunigung. Sie muss aufgebracht werden, um das durch die Schaltgerade vorgegebene Verhalten umzusetzen. Der Beschleunigungsverlauf ist durch eine große Beschleunigung zu Beginn des Manövers mit anschließender sanfter Annäherung an den Endwert $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \ddot{x} = 0 \text{ m/s}^2$ charakterisiert. Übertragen auf eine reale Fahrsituation – hier der Annäherung an ein 100 m entferntes Vorderfahrzeug – entspricht das beobachtete Verhalten nur teilweise den gestellten Anforderungen. Ein positives Merkmal des Beschleunigungsverlaufs ist die stetige Differenzierbarkeit. Für den gesamten Verlauf treten keine unkomfortablen Beschleunigungssprünge auf. Ein Problem entsteht aus dem linearen Zusammenhang zwischen dem Abstand und der Relativgeschwindigkeit, der durch die Schaltgerade beschrieben wird. Mit zunehmender Entfernung zum Vorderfahrzeug wachsen die auftretenden Relativgeschwindigkeiten und Beschleunigungen an. Diesem Effekt könnte durch eine geringere Steigung der Schaltgeraden begegnet werden, allerdings würde diese Maßnahme gleichzeitig zu einem verlangsamten Annähern an den Wunschabstand führen.

Der Zielkonflikt zwischen angemessenen Relativgeschwindigkeiten und Beschleunigungen bei großen Abständen und einem schnellen Einregeln des Wunschabstands bei kleinen Abständen lässt sich durch eine Schaltgerade mit konstanter Steigung nicht lösen. Da eine Schaltgerade mit variabler Steigung zu einem undurchsichtigen und schwer parametrierbaren Verhalten führt, wird im folgenden Abschnitt eine nichtlineare Schaltfunktion entworfen, mit der die beschriebenen Schwächen einer linearen Schaltfunktion behandelt werden können.

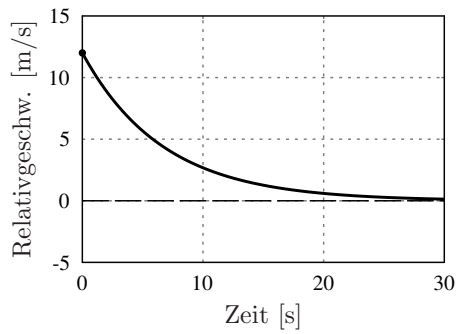
Kapitel 4 Regelung



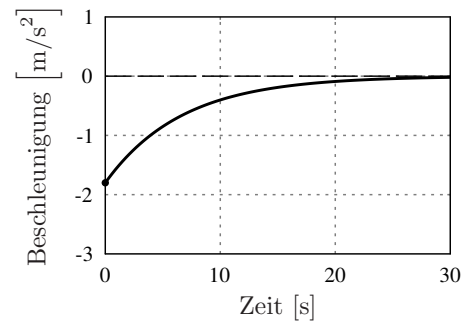
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4.8: (a) Systembewegung entlang einer Schaltgeraden und zeitlicher Verlauf der Zustände (b) Abstand, (c) Relativgeschwindigkeit und (d) Beschleunigung.

Nichtlineare Schaltfunktion

Der folgende Abschnitt beschreibt den Entwurf einer nichtlinearen Schaltfunktion, mit der sich der Gleitzustand intuitiv für den Nah- und Fernbereich hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug anpassen lässt. Als Ausgangspunkt für die Schaltfunktion dient wie im vorigen Abschnitt eine Gerade, jedoch wird das übermäßige Anwachsen der Relativgeschwindigkeit und der Beschleunigung durch eine Abflachung der Schaltkurve bei großen Abständen verhindert.

Entsprechend Abbildung 4.9(a) werden dazu eine nach links und eine nach rechts geöffnete Parabel derart vorgegeben, dass der lineare Teil der Schaltkurve stetig in einen parabelförmigen Verlauf übergeht. Dieses Vorgehen wird auch als „Vorschuhung“ bezeichnet und wird beispielsweise bei Anhaltetvorgängen in der Bahntechnik eingesetzt (Schnieder 2007). Den Überlegungen aus Abschnitt 4.1.2 folgend, entsprechen diese parabelförmigen Trajektorien im Phasenraum konstanten positiven bzw. negativen Beschleunigungen des Fahrzeugs. Um einen stetigen Übergang zwischen der Gerade und den Parabeln zu erhalten, werden die Parabeln entlang der Δx -Achse verschoben, so dass die Gerade zwei Tangentialpunkte $T^- = (\Delta x_T^-, \Delta \dot{x}_T^-)$ und $T^+ = (\Delta x_T^+, \Delta \dot{x}_T^+)$ besitzt. Die Beschreibung der Schaltfunktion erfolgt damit stückweise anhand von

$$s_{\text{längs}}(\Delta x, \Delta \dot{x}) = \begin{cases} \sqrt{2a_{\text{längs}}^- (\Delta x - \Delta x_V^-)} - \Delta \dot{x} & , \text{ für } \Delta x < \Delta x_T^- \\ m_{\text{längs}} (\Delta x - \Delta x_{\text{soll}}) - \Delta \dot{x} & , \text{ für } \Delta x_T^- \leq \Delta x < \Delta x_T^+ \\ -\sqrt{2a_{\text{längs}}^+ (\Delta x - \Delta x_V^+)} - \Delta \dot{x} & , \text{ für } \Delta x_T^+ \leq \Delta x \end{cases} \quad (4.21)$$

mit den Verschiebungen der linken bzw. rechten Parabel

$$\Delta x_V^{-|+} = \Delta x_{\text{soll}} + \frac{a_{\text{längs}}^{-|+}}{2m_{\text{längs}}^2},$$

den Δx -Werten der Tangentialpunkte

$$\Delta x_T^{-|+} = \Delta x_{\text{soll}} + \frac{a_{\text{längs}}^{-|+}}{m_{\text{längs}}^2}$$

sowie den konstanten Parametern $m_{\text{längs}}$, $a_{\text{längs}}^-$ und $a_{\text{längs}}^+$. Um eine nach Gleichung (4.21) konstruierte Schaltkurve in eine Fahrzeugbewegung umzusetzen, werden entsprechend den definierten Abschnitten konstante bzw. asymptotisch verlaufende Beschleunigungen benötigt. Abbildung 4.9(b) zeigt beispielhaft einen Beschleunigungsverlauf für ein Annäherungsmanöver aus 100 m Entfernung. Zu Beginn des Manövers folgt der Systemzustand der durch $a_{\text{längs}}^-$ parametrisierten Parabel, so dass sich eine konstante negative Beschleunigung ergibt. Nach Erreichen des Tangentialpunktes T^- bewegt sich der Systemzustand entlang der Gerade mit der Steigung $m_{\text{längs}}$. Es ergibt sich ein asymptotischer Beschleunigungsverlauf. Analoge Überlegungen lassen sich für ein Unterschreiten des Wunschabstands anstellen. Hier erfolgt die Systembewegung zunächst entlang einer durch $a_{\text{längs}}^+$

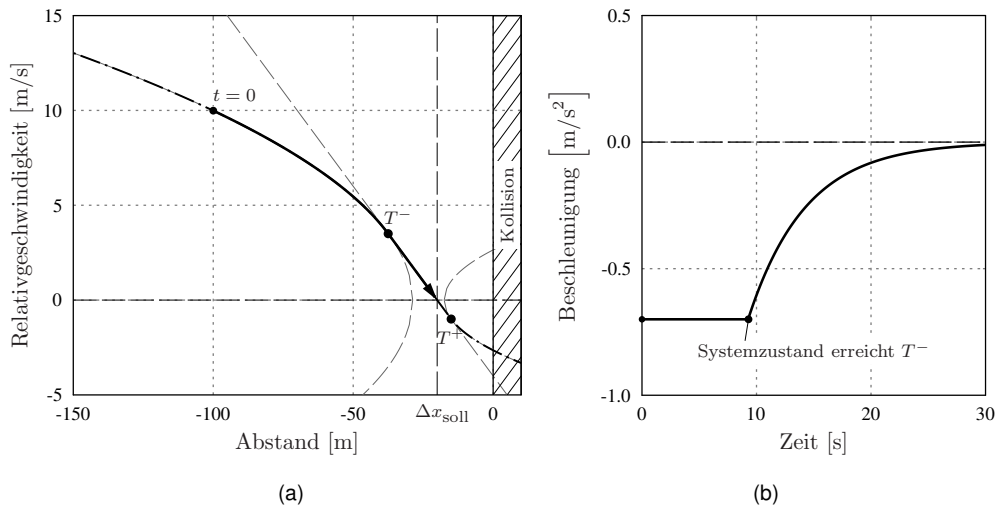


Abbildung 4.9: (a) Konstruktion der nichtlinearen Schaltkurve und (b) benötigte Beschleunigung für eine Führung des Systemzustands entlang der Schaltkurve.

parametrierten Parabel, wodurch sich eine konstante positive Beschleunigung ergibt. Wird der Tangentialpunkt T^+ erreicht, erfolgt wiederum eine asymptotische Annäherung an den Zielzustand.

Damit wie im dargestellten Beispiel eine stabile Dynamik im Gleitzustand auftritt, muss die Schaltfunktion die Bedingung

$$s_{\text{längs}}(\Delta x) (\Delta x - \Delta x_{\text{soll}}) < 0 \quad (4.22)$$

erfüllen. Durch diese Ungleichung werden positive Relativgeschwindigkeiten für Abstände, die kleiner als der Wunschabstand sind und negative Relativgeschwindigkeiten für Abstände, die größer als der Wunschabstand sind, gefordert. In diesem Fall strebt das geregelte System für beliebige Stellen auf der Schaltfunktion dem Wunschabstand entgegen. Für die Parameter der Schaltfunktion folgt aus Bedingung (4.22), dass $a_{\text{längs}}^- < 0$, $m_{\text{längs}} < 0$ und $a_{\text{längs}}^+ > 0$ gelten muss.

Die nichtlineare Schaltfunktion (4.21) ermöglicht eine intuitive Einstellung des Systemverhaltens im Gleitzustand. Der bezüglich des Wunschabstands in Richtung größerer Entfernungen zu einem Vorderfahrzeug verlaufende Teil der Schaltfunktion beschreibt dabei das Verhalten für Annäherungen an das Vorderfahrzeug. Der Teil in Richtung kleinerer Abstände bestimmt das Rückfallverhalten, sollte das geregelte Fahrzeug den Wunschabstand zum Vorderfahrzeug unterschritten haben. Durch Bedingung (4.22) ist weiterhin gewährleistet, dass bei einer Führung des Systemzustands entlang der Schaltkurve ein stabiles Verhalten auftritt und der Systemzustand asymptotisch dem Zielzustand entgegenstrebt. Mit der Vorgabe der Schaltfunktion und damit der gewünschten Systemdynamik ist der erste Schritt zum Entwurf einer *Sliding-Mode*-Regelung vollzogen. Nach Abschnitt 4.1.2 sieht

der zweite Entwurfsschritt die Festlegung eines Regelgesetzes vor, das eine Bewegung des Systemzustands entlang der Schaltkurve bewirkt.

4.2.3 Regelgesetz (längs)

Im vorangegangenen Abschnitt wurde eine nichtlineare Schaltfunktion definiert, mit der sich ein geeignetes Annäherungs- und Rückfallverhalten für die Abstandsregelung vorgeben lässt. Im folgenden Abschnitt wird ein Regelgesetz bestimmt, das dem Fahrzeug dieses Verhalten aufträgt. Dabei werden zwei wesentliche Forderungen an das Regelgesetz gestellt. Für Systemzustände, die nicht auf der Schaltkurve liegen, soll das Regelgesetz eine Annäherung an die Schaltkurve bewirken. Hat der Systemzustand die Schaltkurve erreicht, soll diese nicht wieder verlassen werden. Die mit diesen beiden Forderungen verknüpften Eigenschaften der Erreichbarkeit und der Attraktivität werden zunächst für die in Abschnitt 4.1.2 dargestellte Relais-Regelung untersucht. Da die Relais-Regelung zu unkomfortablen Beschleunigungsanforderungen führt, wird anschließend ein Grenzschichtkonzept entworfen, mit dem sich ein komfortables Reglerverhalten für unkritische Verkehrssituationen und ein aggressives Verhalten für kritische Situationen realisieren lässt.

Erreichbarkeit und Attraktivität mit einem Relais-Regelgesetz

Bei der Relais-Regelung wird die Soll-Beschleunigung $\Delta \ddot{x}_{\text{soll}}$ anhand der Lage des Systemzustands bezüglich der mit Gleichung (4.21) definierten Schaltfunktion $s_{\text{längs}}$ bestimmt. Befindet sich der Systemzustand oberhalb der Schaltkurve, wird die maximale dem System zur Verfügung stehende negative Fahrzeugbeschleunigung \ddot{x}_{max}^- angefordert. Für Systemzustände unterhalb der Schaltkurve wird als Anforderung die maximale positive Beschleunigung \ddot{x}_{max}^+ generiert. Als Regelgesetz ergibt sich somit

$$\Delta \ddot{x}_{\text{soll}}(t) = \begin{cases} \ddot{x}_{\text{max}}^+ & , \text{ für } s_{\text{längs}}(\Delta x) < 0 \\ \ddot{x}_{\text{max}}^- & , \text{ für } s_{\text{längs}}(\Delta x) > 0. \end{cases} \quad (4.23)$$

Welche Schaltkurvenverläufe für das angegebene Regelgesetz die geforderte Erreichbarkeit und Attraktivität aufweisen, wird anhand Abbildung 4.10 veranschaulicht. Die Abbildung zeigt das aus Gleichung (4.23) resultierende Richtungsfeld für die Soll-Beschleunigungen $\ddot{x}_{\text{max}}^- = -3,0 \text{ m/s}^2$ und $\ddot{x}_{\text{max}}^+ = 1,5 \text{ m/s}^2$. Wie in Abschnitt 4.2.1 erwähnt, orientieren sich diese Werte an der Richtlinie ISO 15622. In der Abbildung ist weiterhin strichpunktiert eine beispielhafte Schaltkurve eingezeichnet. Damit die Schaltkurve erreichbar ist, müssen die durch das Regelgesetz erzeugten Eingriffe den Systemzustand in Richtung der Schaltkurve führen. Attraktivität ist darüberhinaus gewährleistet, wenn die Systemtrajektorien nach Überqueren der Schaltkurve wiederum auf die Schaltkurve führen. Bei der Beantwortung der Frage, welche nach Gleichung (4.21) gebildeten Schaltkurven attraktiv sind, wird von der *worst-case*-Annahme einer unendlichen Steigung des linearen Anteils $m_{\text{längs}}$ der Schaltfunktion ausgegangen. Die Schaltkurve setzt sich damit aus den beiden durch

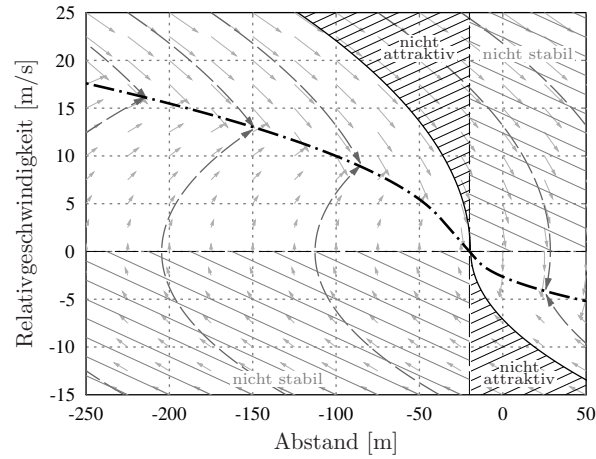


Abbildung 4.10: Attraktivitätsbereiche für Auslegungen der nichtlinearen Schaltkurve unter dem Einfluss einer Relais-Regelung.

$a_{\text{längs}}^-$ und $a_{\text{längs}}^+$ gegebenen Parabeln zusammen, die im Wunschabstand Δx_{soll} ineinander übergehen. Werden die Maximalbeschleunigungen $a_{\text{längs}}^- = \ddot{x}_{\text{max}}^-$ und $a_{\text{längs}}^+ = \ddot{x}_{\text{max}}^+$ als Parameter gewählt, erhält man eine Schaltkurve, die entlang den Trajektorien der beiden Reglerstrukturen verläuft. Wird eine Schaltkurve so parametrisiert, dass sie oberhalb bzw. unterhalb dieser maximalen Schaltkurve verläuft, führen die Systemtrajektorien nicht direkt auf die Schaltkurve zurück. Nach Gleichung (4.21) konstruierte Schaltkurven sind in diesem Fall nicht attraktiv. Die Bereiche, in denen Attraktivität nicht gewährleistet ist, sind in der Abbildung schwarz schraffiert eingezeichnet. Darüberhinaus sind die Bereiche grau schraffiert gekennzeichnet, in denen Bedingung (4.22) nicht erfüllt ist, die also zu einer instabilen Dynamik führen.

Nach den anschaulichen Überlegungen werden die Bereiche der Erreichbarkeit und Attraktivität nun mathematisch bestimmt. Dazu wird entsprechend den Gleichungen (4.9) und (4.10) aus Abschnitt 4.1.2 ein Ljapunov-Ansatz mit der Kandidatenfunktion

$$V_{\text{längs}}(s_{\text{längs}}) = \frac{1}{2} s_{\text{längs}}^2$$

gewählt. Für Bereiche der Schaltkurve, in denen die Ableitung der Kandidatenfunktion die Ungleichung

$$\dot{V}_{\text{längs}}(s_{\text{längs}}) = s_{\text{längs}} \dot{s}_{\text{längs}} < 0 \quad (4.24)$$

erfüllt, enden von beiden Seiten Systemtrajektorien auf der Schaltkurve und es tritt ein Gleitzustand auf.

Zunächst wird der parabelförmige Abschnitt der durch (4.21) abschnittsweise definierten Funktion mit $\Delta x \leq \Delta x_{\text{T}}^-$ betrachtet. In diesem Bereich entspricht die Schaltfunktion

$$s_{\text{längs}} = \sqrt{2a_{\text{längs}}^- (\Delta x - \Delta x_{\text{V}}^-)} - \Delta \dot{x}, \quad \Delta x \leq \Delta x_{\text{T}}^- \quad (4.25)$$

und besitzt die Ableitung

$$\dot{s}_{\text{längs}} = \frac{a_{\text{längs}}^- \Delta \dot{x}}{\sqrt{2a_{\text{längs}}^- (\Delta x - \Delta x_V^-)}} - \Delta \ddot{x}.$$

Mit der gewählten Relais-Regelung als Regelgesetz ergibt sich $\Delta \ddot{x}$ aus Gleichung (4.23) und man erhält mit Ungleichung (4.24) die Bedingung

$$\begin{aligned} \dot{V}(s_{\text{längs}}) &= s_{\text{längs}} \dot{s}_{\text{längs}} \\ &= s_{\text{längs}} \left(\frac{a_{\text{längs}}^- \Delta \dot{x}}{\sqrt{2a_{\text{längs}}^- (\Delta x - \Delta x_V^-)}} - \ddot{x}_{\text{soll}} \right) \stackrel{!}{<} 0. \end{aligned}$$

Werden positive Abweichungen von der Schaltkurve betrachtet, also $s_{\text{längs}} > 0$ und damit $\ddot{x}_{\text{soll}} = \ddot{x}_{\text{max}}^-$, muss

$$\frac{a_{\text{längs}}^- \Delta \dot{x}}{\sqrt{2a_{\text{längs}}^- (\Delta x - \Delta x_V^-)}} - \ddot{x}_{\text{max}}^- \stackrel{!}{<} 0$$

gelten, damit (4.24) erfüllt ist. Durch Umformung und Einsetzen von Gleichung (4.25) lautet die Bedingung für Attraktivität

$$\underbrace{\sqrt{2a_{\text{längs}}^- (\Delta x - \Delta x_V^-)}}_{\Delta \dot{x}} \stackrel{!}{<} \frac{\ddot{x}_{\text{max}}^-}{a_{\text{längs}}^-} \underbrace{\sqrt{2a_{\text{längs}}^- (\Delta x - \Delta x_V^-)}}_{\Delta \dot{x}}.$$

Sie ist für $\frac{\ddot{x}_{\text{max}}^-}{a_{\text{längs}}^-} > 1$ erfüllt. Dies ist gleichbedeutend mit der zuvor anschaulich gewonnenen Forderung, dass die Schaltkurve für Annäherungen an ein Vorderfahrzeug unterhalb der Trajektorie für maximale Verzögerungen verlaufen muss. Für den Parameter $a_{\text{längs}}^-$ ergibt sich das Intervall $]\ddot{x}_{\text{max}}^-, 0[$.

Für den nach Gleichung (4.21) definierten linearen Teil der Schaltfunktion gilt

$$s_{\text{längs}} = m_{\text{längs}} (\Delta x - \Delta x_{\text{soll}}) - \Delta \dot{x}, \quad \Delta x_T^- < \Delta x < \Delta x_T^+$$

und damit

$$\dot{s}_{\text{längs}} = m_{\text{längs}} \Delta \dot{x} - \Delta \ddot{x}.$$

Werden wiederum positive Abweichungen von der Schaltkurve betrachtet, d. h. $s_{\text{längs}} > 0$ und $\Delta \ddot{x} = \ddot{x}_{\text{max}}^-$, ergibt sich aus Ungleichung (4.24) die Bedingung

$$\begin{aligned} \dot{V}(s_{\text{längs}}) &= s_{\text{längs}} \dot{s}_{\text{längs}} \\ &= s_{\text{längs}} (m_{\text{längs}} \Delta \dot{x} - \ddot{x}_{\text{max}}^-) \stackrel{!}{<} 0. \end{aligned}$$

Bereiche auf der Schaltgeraden sind demnach attraktiv, wenn

$$\Delta \dot{x} < \frac{\ddot{x}_{\text{max}}^-}{m_{\text{längs}}}$$

erfüllt ist. Durch Einsetzen der Geradengleichung $\Delta \dot{x} = m_{\text{l\"angs}} (\Delta x - \Delta x_{\text{soll}})$ ergibt sich als Bedingung für den Abstand, ab dem die Schaltfunktion attraktiv ist:

$$\Delta x \stackrel{!}{>} \Delta x_{\text{soll}} + \frac{\dot{x}_{\text{max}}^-}{m_{\text{l\"angs}}^2}.$$

Unter Berücksichtigung der Intervallgrenzen für den Parameter a_{max}^- ergibt der Vergleich mit dem Abstand des Übergangspunktes Δx_{T}^- der linken Parabel in das Geradenstück

$$\Delta x_{\text{soll}} + \frac{\dot{x}_{\text{max}}^-}{m_{\text{l\"angs}}^2} > \Delta x_{\text{soll}} + \frac{a_{\text{l\"angs}}^-}{m_{\text{l\"angs}}^2}.$$

Für das zuvor bestimmte Parameterintervall $a_{\text{l\"angs}}^- \in]\ddot{x}_{\text{max}}^-, 0[$ ist diese Bedingung für beliebige Steigungen $m_{\text{l\"angs}} < 0$ erfüllt und somit attraktiv.

Die Untersuchung der Erreichbarkeit und Attraktivität für Systemzustände unterhalb der Schaltkurve und für den parabelförmigen Abschnitt rechts des Soll-Abstands, d. h. $\Delta x \geq \Delta x_{\text{T}}^+$, erfolgt analog zu den vorangegangenen Berechnungen. Als Ergebnis erhält man das Parameterintervall $a_{\text{l\"angs}}^+ \in]0, \ddot{x}_{\text{max}}^+[$.

Grenzschichtkonzept

Die Untersuchungen der Erreichbarkeit und der Attraktivität für die durch Gleichung (4.21) definierte Schaltfunktion wurde im vorangegangenen Abschnitt unter dem Einfluss einer Relais-Regelung vorgenommen. In der praktischen Anwendung führt diese Art der Regelung allerdings zu hochfrequenten Schaltprozessen im Gleitzustand. Ebenso erfolgt die Annäherung an die Schaltkurve durch Aufschalten der Maximalwerte für positive und negative Soll-Beschleunigungen. Diesem unkomfortablen Reglerverhalten wird im folgenden Abschnitt durch die Einführung eines Grenzschichtkonzepts begegnet.

Wie in Abschnitt 4.1.2 dargestellt, wird durch die Einführung einer Grenzschicht das diskontinuierliche Regelgesetz einer Relais-Regelung durch eine kontinuierliche Approximation ersetzt. Die Breite der Grenzschicht beeinflusst einerseits den Grad der Unterdrückung von hochfrequenten Stellsignalverläufen, andererseits verringert sich die Exaktheit der Regelung mit zunehmender Grenzschichtbreite. Für die hier betrachtete Abstandsregelung kann dieser Effekt genutzt werden, um ein angemessenes Verhalten in verschiedenen Verkehrssituationen zu erreichen. Erfolgt eine Annäherung aus großer Entfernung, soll das Regelsystem lediglich mit geringen Eingriffen reagieren. Die Gefahr einer Kollision ist nicht gegeben, lediglich bei übermäßig großen Relativgeschwindigkeiten sollte eine Verzögerung erfolgen. In solchen Situationen bewirkt eine breite Grenzschicht das gewünschte Verhalten. Für kleine Abstände zum Vorderfahrzeug ist eine exakte Regelung mit starken Reglereingriffen erforderlich. Um kritische Situationen zu vermeiden, wird deshalb eine schmale Grenzschicht gewählt.

Bei der im Folgenden beschriebenen *Sliding-Mode*-Abstandsregelung kommt ein mehrstufiges Grenzschichtkonzept zum Einsatz. Wie in Abbildung 4.11(a) dargestellt, werden

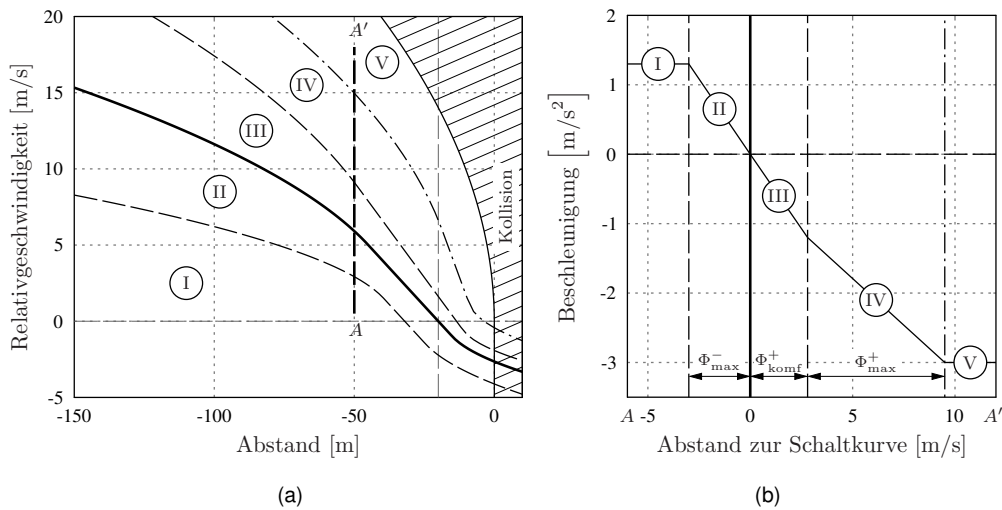


Abbildung 4.11: (a) Grenzsichtkonzept für die Abstandsregelung und (b) generierte Stellgrößen entlang der Strecke $\overline{AA'}$.

um die durchgezogen eingezeichnete Schaltkurve drei weitere Kurven als Grenzverläufe vorgegeben. Der Phasenraum wird dadurch in die Bereiche I bis V unterteilt. Die Bereiche I und II beeinflussen das Beschleunigungsverhalten des Regelsystems. Aus der Vorgabe der Bereiche III, IV und V ergibt sich das Verzögerungsverhalten. Neben dem Verlauf der Grenzen müssen zur vollständigen Festlegung zusätzlich Soll-Beschleunigungen angegeben werden, die an den Grenzkurven als Ausgabegröße erzeugt werden. Zwischen den Soll-Beschleunigungen wird linear in Δx -Richtung interpoliert. Dadurch ergibt sich ein Verlauf der Stellgröße in Abhängigkeit vom Abstand zur Schaltkurve, der beispielhaft für einen Abstand von 50 m zum Vorderfahrzeug in Abbildung 4.11(b) dargestellt ist. Die Breite der Grenzsicht unterhalb der Schaltkurve wird mit Φ_{\max}^- bezeichnet. Oberhalb der Schaltkurve folgen Grenzsichten der Breite Φ_{komf}^+ und Φ_{\max}^+ .

Es soll nun die Bedeutung der verschiedenen Grenzsichten für das Reglerverhalten geklärt werden. Der Grenzkurvenverlauf entspricht dem Verlauf der Schaltkurve und wird ebenfalls anhand von Gleichung (4.21) festgelegt. Bezüglich der Schaltkurve erfolgt jedoch eine Verschiebung in Δx -Richtung.

- **Bereich I:** Das geregelte Fahrzeug befindet sich bezüglich des Vorderfahrzeugs in einer unkritischen Situation. Insbesondere die Annäherungsgeschwindigkeit ist auf geringe Werte begrenzt. Als Ausgangsgröße wird die maximale positive Beschleunigung $\Delta \ddot{x}_{\text{soll}} = \ddot{x}_{\max}^+$ erzeugt. Durch diesen Eingriff wird eine positive Relativgeschwindigkeit aufgebaut, bis der Systemzustand Bereich II erreicht.
- **Bereich II:** In diesem Bereich erfolgt bei weiterer Annäherung an die Schaltkurve ein Übergang zur Soll-Beschleunigung $\Delta \ddot{x}_{\text{soll}} = 0 \text{ m/s}^2$. Durch eine zunehmende Breite Φ_{\max}^- für große Abstände kann ein vorausschauendes Reglerverhalten realisiert wer-

den, da die positive Beschleunigung bereits vor Erreichen der Schaltkurve reduziert wird und unnötige Beschleunigungen vermieden werden.

- **Bereich III:** Der Systemzustand befindet sich oberhalb der Schaltkurve. Um den Abstand zur Schaltkurve zu verringern, werden negative Beschleunigungsvorgaben generiert. Proportional zum Abstand des Systemzustands von der Schaltkurve wächst die Soll-Beschleunigung bis auf einen Wert von \ddot{x}_{komf}^- an der Bereichsgrenze bei einer Abweichung von Φ_{komf}^+ an. In Bereich III werden auf diese Weise komfortable Verzögerungen erzeugt, durch die der Systemzustand in Richtung der Schaltkurve geführt wird. Wie in Abbildung 4.11(a) ersichtlich, bilden die Bereiche II und III eine Grenzschicht um die Schaltkurve, die sich mit zunehmender Annäherung an den Wunschabstand verengt. Für große Entfernungen zum Vorderfahrzeug wird die Exaktheit der Regelung zu Gunsten eines komfortablen Fahrverhaltens eingeschränkt. Im Verlauf der Annäherung wird durch das Verengen der Grenzschicht eine exakte Regelung realisiert.
- **Bereich IV:** Ausgehend von der Soll-Beschleunigung \ddot{x}_{komf}^- an der Grenze zu Bereich III wird die Beschleunigungsanforderung in diesem Bereich mit zunehmendem Abstand zur Schaltfunktion auf die maximale Verzögerung \ddot{x}_{max}^- bei einem Abstand von Φ_{max}^+ erhöht. Bereich IV umfasst kritische Verkehrssituationen, die jedoch durch Reglereingriffe in den vorgegebenen Grenzen bewältigt werden können.
- **Bereich V:** Das geregelte Fahrzeug befindet sich bezüglich des Vorderfahrzeugs in einer kritischen Situation. Im gesamten Bereich wird die Maximalverzögerung \ddot{x}_{max}^- als Ausgangsgröße generiert. Durch die Begrenzung der Maximalverzögerung ergibt sich der in Abbildung 4.11(a) schraffiert dargestellte Bereich, für den eine Kollision mit dem maximal zugelassenen Stelleingriff nicht zu vermeiden ist. In einer derartigen Situation wird der Fahrer aufgefordert, die Längsführung des Fahrzeugs zu übernehmen.

Mit der Festlegung der beschriebenen Bereiche und den entsprechenden Soll-Beschleunigungen an den Bereichsgrenzen ist der *Sliding-Mode*-Regler für die Abstandsregelung vollständig beschrieben. Als Regelgesetz ergibt sich

$$\Delta \ddot{x}_{\text{soll}}(t) = \begin{cases} \ddot{x}_{\text{max}}^+ & , \text{ für } s_{\text{längs}} < \Phi_{\text{max}}^- \\ \frac{s_{\text{längs}}}{\Phi_{\text{max}}^-} \ddot{x}_{\text{max}}^+ & , \text{ für } \Phi_{\text{max}}^- \leq s_{\text{längs}} < 0 \\ \frac{s_{\text{längs}}}{\Phi_{\text{komf}}^+} \ddot{x}_{\text{komf}}^- & , \text{ für } 0 \leq s_{\text{längs}} < \Phi_{\text{komf}}^+ \\ \ddot{x}_{\text{komf}}^- + \frac{s_{\text{längs}} - \Phi_{\text{komf}}^+}{\Phi_{\text{max}}^+} (\ddot{x}_{\text{max}}^- - \ddot{x}_{\text{komf}}^-) & , \text{ für } \Phi_{\text{komf}}^+ \leq s_{\text{längs}} < \Phi_{\text{max}}^+ \\ \ddot{x}_{\text{max}}^- & , \text{ für } \Phi_{\text{max}}^+ \leq s_{\text{längs}} \end{cases}$$

Abbildung 4.12 zeigt das aus einer beispielhaften Auslegung des Reglers resultierende Richtungsfeld. Zur Verdeutlichung des Reglerverhaltens sind außerdem die Systemtrajektorien für zwei Annäherungsmanöver mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen eingezeichnet. Zu Beginn des Manövers A besitzt das geregelte Fahrzeug einen Abstand von 140m zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die Relativgeschwindigkeit beträgt zu diesem

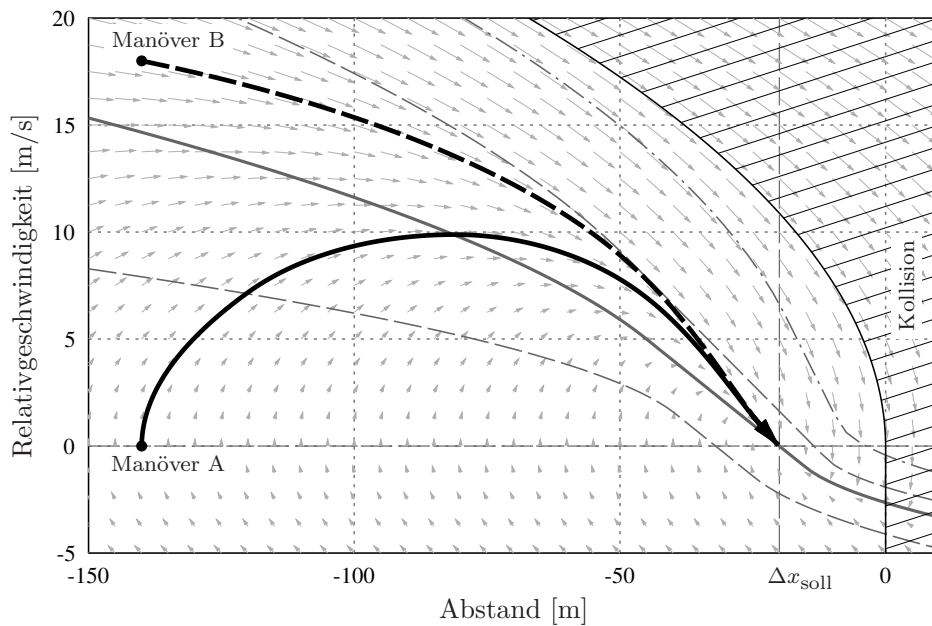


Abbildung 4.12: Richtungsfeld für einen *Sliding-Mode*-Regler mit mehrstufigem Grenzschichtkonzept und Annäherungsmanöver mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen.

Zeitpunkt 0 m/s. Wird ausgehend von dieser Situation die Wunschgeschwindigkeit erhöht, erfolgt eine Annäherung an das Vorderfahrzeug. Entsprechend dem beschriebenen Regelgesetz wird zunächst maximal positiv beschleunigt. Noch bevor der Systemzustand die Schaltkurve erreicht, wird die angeforderte Beschleunigung frühzeitig verringert, so dass eine unnötig hohe Relativgeschwindigkeit vermieden wird. Überquert der Systemzustand die Schaltkurve beginnt eine Phase der Verzögerung. Gegen Ende des Manövers fällt der Verlauf der Systemtrajektorie mit dem linearen Teil der Schaltkurve zusammen. Im vorgegebenen Wunschabstand von 20 m ist ein stationärer Zustand erreicht.

Manöver B beginnt ebenfalls mit einem Abstand von 140 m. Im Unterschied zu dem zuvor betrachteten Manöver nähert sich das geregelte Fahrzeug zu Beginn mit einer Relativgeschwindigkeit von 18 m/s, also ungefähr 65 km/h, dem Vorderfahrzeug an. Der Systemzustand befindet sich oberhalb der Schaltkurve, so dass negative Beschleunigungsanforderungen generiert werden. Die Auffächerung der Grenzschichten für große Abstände bewirkt, dass auf das Vorderfahrzeug zunächst nur mit einer schwachen Verzögerung reagiert wird. Im Verlauf des Manövers nähert sich das geregelte Fahrzeug weiter an und die Grenzschichten um die Schaltkurve verengen sich. Das hat zur Folge, dass die Regelung exakter als bei großen Abständen erfolgt. Gegen Ende des Manövers entspricht der Verlauf der Systemtrajektorie dem für Manöver A beobachteten Verlauf.

Die beispielhaften Szenarien zeigen, wie die Bewegung des geregelten Fahrzeugs aus

qualitativ unterschiedlichen Anfangszuständen in den Zustand einer Folgefahrt bei gewünschtem Abstand überführt wird. Durch die Visualisierung des Reglerverhaltens mittels eines Richtungsfelds wird eine graphisch gestützte Einstellung der Reglerparameter ermöglicht.

4.2.4 Parametrierung (längs)

Im folgenden Abschnitt werden Parametrierungsbeispiele des *Sliding-Mode*-Abstandsreglers und daraus entstehende Charakteristika des Systemverhaltens vorgestellt. Sie dienen der Veranschaulichung extremer Verhaltensweisen und eignen sich nicht für eine Applikation in realen Fahrzeugen.

Als Beispielszenario für alle untersuchten Parametrierungen wird das zuvor betrachtete Manöver A mit einem anfänglichen Abstand zum Vorderfahrzeug von 140 m und einer Relativgeschwindigkeit von 0 m/s gewählt. Die eingestellte Wunschgeschwindigkeit ist größer als die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs, so dass zunächst eine Beschleunigung erfolgt. Nähert sich das geregelte Fahrzeug dem Zielfahrzeug, folgt eine Phase der Verzögerung. Als Zielzustand wird eine stationäre Folgefahrt in einem Abstand von 20 m vorgegeben.

Späte vs. vorausschauende Fahrzeugreaktion

Die in Abbildung 4.13(a) dargestellte Parametrierung zeichnet sich durch einen steilen Verlauf der Schaltkurve aus. Weiterhin besitzen die Grenzsichten für den gesamten betrachteten Bereich eine annähernd konstante Breite. Das resultierende Systemverhalten ist durch eine Beschleunigungsphase charakterisiert, in der sich bis zum Erreichen der Schaltkurve eine Relativgeschwindigkeit von ca. 12 m/s aufbaut. Der Wunschabstand wird anschließend durch eine starke Verzögerung erreicht. Die beschriebene Parametrierung führt zu einer späten und heftigen Reaktion des geregelten Fahrzeugs auf das Vorderfahrzeug. Im Gegensatz zu diesem Verhalten ist in Abbildung 4.13(b) eine Auslegung veranschaulicht, die zu einem vorausschauenden Systemverhalten führt. Der Verlauf der Schaltkurve ist im Vergleich zur zuvor betrachteten Parametrierung flacher. Außerdem weitet sich die Grenzsicht unterhalb der Schaltkurve für zunehmende Abstände auf. Wie zuvor wird zu Beginn des Manövers beschleunigt, allerdings verringert sich die Beschleunigung schon ab einer Relativgeschwindigkeit von ungefähr 5 m/s. Bei Erreichen der Schaltkurve nähert sich das geregelte Fahrzeug dem Vorderfahrzeug deutlich langsamer an als im vorangegangenen Fall. Ebenso erfolgt die Überführung in den Zielzustand langsamer und mit schwächeren Bremsingriffen. Das beobachtete Verhalten wird als vorausschauend bezeichnet, da eine Fahrzeugreaktion bereits bei großen Abständen erfolgt. Dadurch werden hohe Relativgeschwindigkeiten und starke Beschleunigungen vermieden.

Exakte Regelung vs. Überschwingen

Abbildung 4.13(c) zeigt das Reglerverhalten für eine Parametrierung, die eine exakte Umsetzung der vorgegebenen Dynamik bewirkt. Dies wird durch geringe Grenzschiebungen oberhalb und unterhalb der Schaltkurve erreicht, die sich bei Annäherung an den Wunschabstand weiter verringern. Durch große Soll-Beschleunigungswerte an den Bereichsgrenzen wird der Systemzustand dicht an der Schaltkurve geführt. Die Stärke der Reglereingriffe lässt sich durch die Soll-Beschleunigungswerte an den Grenzverläufen variieren. Abbildung 4.13(d) zeigt die Annäherung für eine geringe Soll-Beschleunigung an der ersten positiven Grenzkurve bei ansonsten identischen Parametern. Unterschiede zum zuvor betrachteten Manöver ergeben sich während der Verzögerungsphase. Der Systemzustand verlässt die erste Grenzschiebung oberhalb der Schaltgeraden und nähert sich der zweiten Grenzkurve an. Damit erhöht sich die angeforderte Verzögerung und der Systemzustand wird zunehmend stärker in Richtung der Schaltkurve geführt. Im Verlauf des Manövers wird der Wunschabstand unterschritten. Das geregelte Fahrzeug fällt auf den Zielzustand zurück. Ein solches Verhalten kann in Situationen sinnvoll sein, in denen davon ausgegangen wird, dass der Fahrer das Vorderfahrzeug überholen möchte. Ein frühzeitiges Verringern der Geschwindigkeit könnte in einer solchen Situation die Akzeptanz des Fahrers gegenüber dem System beeinträchtigen.

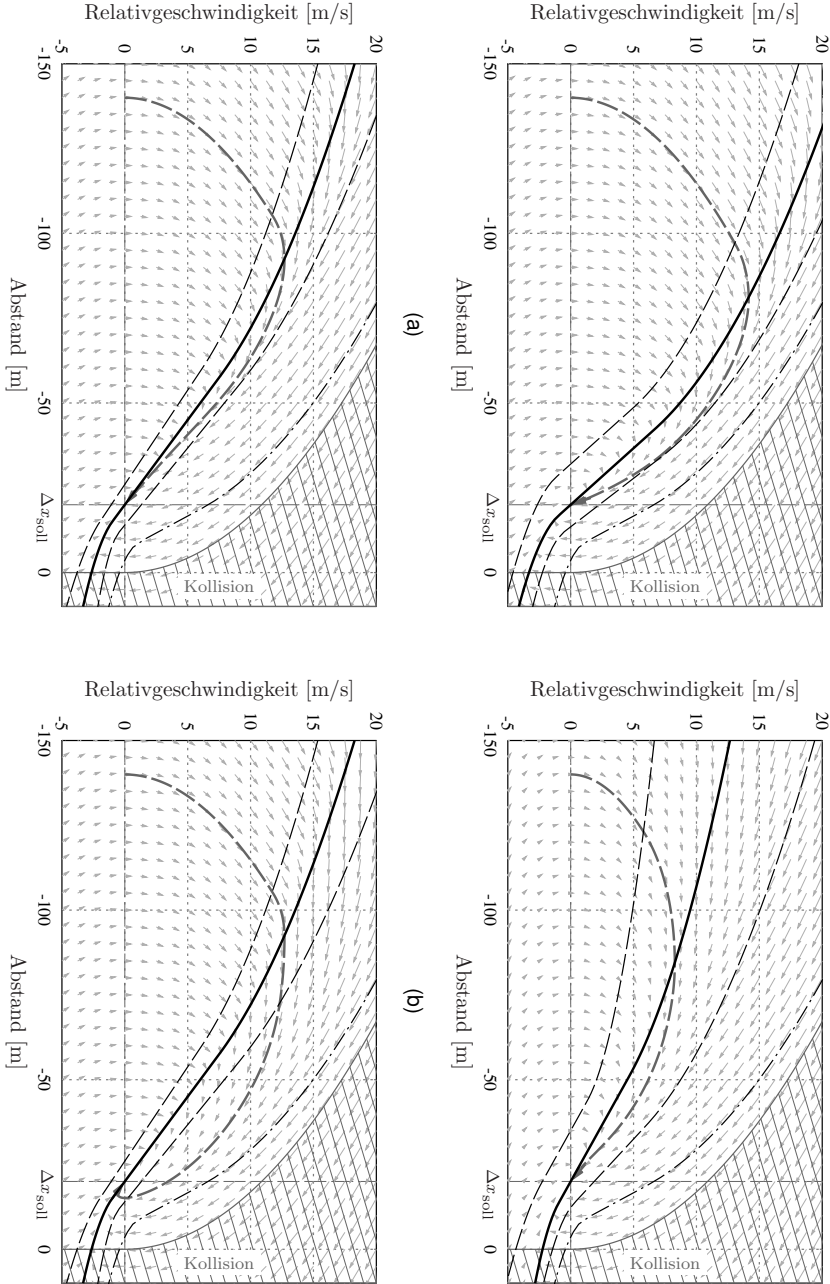


Abbildung 4.13: Parametrierungen der *Sliding-Mode*-Regler für unterschiedliches Systemverhalten: (a) Später Reglereingriff, (b) vor-
ausschauender Reglereingriff, (c) exakte Regelung und (d) Annäherung mit unterschreiten des Wunschabstands.

4.3 Querregelung

Im folgenden Abschnitt wird der Entwurf eines Regelungssystems zur Fahrzeugquerführung beschrieben. Entsprechend Abschnitt 1.2 besteht die Aufgabenstellung in einer Mitlenführung des Versuchsfahrzeugs innerhalb des befahrenen Fahrstreifens. Dazu wurde wie bereits bei der Längsführung eine Regelung nach dem *Sliding-Mode*-Prinzip (vgl. Abschnitt 4.1.2) gewählt.

In Abschnitt 4.3.1 werden Vorüberlegungen hinsichtlich der Anforderungen und der Implementierung der Regelung angestellt.

Abschnitt 4.3.2 beinhaltet die Konstruktion einer Schaltkurve. Diese beschreibt die gewünschte Querdynamik im Gleitzustand.

Zur Umsetzung der vorgegebenen Dynamik wird in Abschnitt 4.3.3 ein Regelgesetz hergeleitet, durch das der Systemzustand entlang der Schaltkurve geführt wird.

Abschließend werden in Abschnitt 4.3.4 Beispiele für Parametrierungen vorgestellt, durch die unterschiedliche Charakteristika bei der automatisierten Querführung erreicht werden.

4.3.1 Überlegungen zur Querregelung

Anforderungen

Das Ziel der Regelung ist eine Führung des Fahrzeugs in der Mitte des Fahrstreifens. Für eine kontinuierliche Führung entlang der Fahrstreifenmitte wird weiterhin eine verschwindende Quergeschwindigkeit bezüglich des Fahrstreifens gefordert. Unter der Annahme geringer Schwimmwinkel impliziert diese Forderung eine parallele Ausrichtung des Fahrzeugs zum Streckenverlauf. Im Gegensatz zu der zuvor betrachteten Abstandsregelung mit unterschiedlichen Anforderungen an das Annäherungs- bzw. Rückfallverhalten wird das Querführungssystem mit einem symmetrischen Verhalten bezüglich der Fahrstreifenmitte ausgelegt. Reaktionen des Systems auf Abweichungen nach links bzw. rechts unterscheiden sich demnach lediglich in der Richtung des Eingriffs, nicht jedoch in der Stärke oder dem qualitativen Verlauf. Durch diese Symmetrie vereinfacht sich der Entwurf und die Parametrierung der Regelung.

Voraussetzung für die automatisierte Querregelung ist die Erkennung des vorausliegenden Fahrbahnverlaufs sowie der Positionierung des Versuchsfahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens. In der vorliegenden Arbeit werden diese Daten über eine monokulare Kamera mit integrierter Bildverarbeitung erfasst. Dieser Sensor liefert anhand von Fahrbahnmarkierungen die Breite und Krümmung des Fahrstreifens sowie den Querversatz bezüglich der Fahrstreifenmitte, im Folgenden auch als Ablage Δy bezeichnet. Außerdem wird der Winkel des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens gemessen.

Die Systemdynamik bei der Umsetzung der genannten Regelungsziele soll der Verkehrssituation entsprechen. Dies bedeutet komfortable Lenkeingriffe in Situationen, in denen sich das geregelte Fahrzeug in der Nähe der Fahrstreifenmitte befindet und starke Eingriffe, wenn das Versuchsfahrzeug droht, den Fahrstreifen zu verlassen. Die Abstimmung der Regelung erfolgte simulationsgestützt und anhand von Testfahrten.

Anwendung der *Sliding-Mode*-Regelung

Die Betrachtungen zur *Sliding-Mode*-Querregelung erfolgen im Phasenraum, der durch die fahrstreifenbezogenen Zustandsgrößen der Ablage Δy und der Quergeschwindigkeit $\Delta \dot{y} = \frac{d}{dt} \Delta y$ gegeben ist. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, handelt es sich bei dem im Folgenden entworfenen Querregler um einen übergeordneten Regler, der als Stellgröße eine Querbeschleunigungsanforderung $\Delta \ddot{y}_{\text{soll}}$ generiert. Diese wird in einem unterlagerten Beschleunigungsregelkreis durch die Ansteuerung der Lenkaktorik in eine tatsächliche Fahrzeugbewegung umgesetzt (vgl. Abschnitt 4.5). Der Einfluss der in Abschnitt 3.3 identifizierten Querdynamik wird einerseits auf Ebene der unterlagerten Regelung, andererseits durch die Robustheitseigenschaften der *Sliding-Mode*-Regelung kompensiert. Für den Reglerentwurf wird deshalb vereinfachend von einem Doppelintegratorsystem mit der Zustandsraumdarstellung

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{y} \\ \Delta \ddot{y} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{=\mathbf{A}_{\text{quer}}} \cdot \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta \dot{y} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{=\mathbf{B}_{\text{quer}}} \cdot \Delta \ddot{y}_{\text{soll}} \quad (4.26)$$

ausgegangen, das strukturell dem Beispielsystem aus Abschnitt 4.1.2 entspricht.

Neben der Ablage hinsichtlich der Fahrstreifenmitte ist insbesondere die Fahrbahnkrümmung des vorausliegenden Streckenabschnitts für die Fahrzeugquerführung von Bedeutung. Das Querführungsverhalten menschlicher Fahrer beim Befahren kurviger Straßen lässt sich durch eine Regelung mit Vorsteuerungsanteil annähern (Mitschke und Walentowitz 2004). Als Vorsteuerung wird ein Lenkradwinkel aufgeschaltet, durch den das Fahrzeug unter idealen Voraussetzungen dem gekrümmten Streckenabschnitt folgt. Abweichungen von der gewünschten Position des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens und Störungen wie beispielsweise der Einfluss von Seitenwind werden in einem Regelprozess ausgeglichen. Diese Struktur wird in der vorliegenden Arbeit übernommen. Die Kompensation der Fahrbahnkrümmung erfolgt dabei innerhalb des unterlagerten Beschleunigungsreglers. Im folgenden Abschnitt wird von einer idealen Krümmungskompensation ausgegangen, so dass sich der Entwurf der Regelung auf die Betrachtung gerader Fahrbahnverläufe beschränkt.

4.3.2 Auslegung des Gleitzustands (quer)

Durch die Festlegung einer Schaltfunktion wird die Systemdynamik im Gleitzustand vorgegeben. Entsprechend den zuvor gestellten Anforderungen soll eine geeignete Schalt-

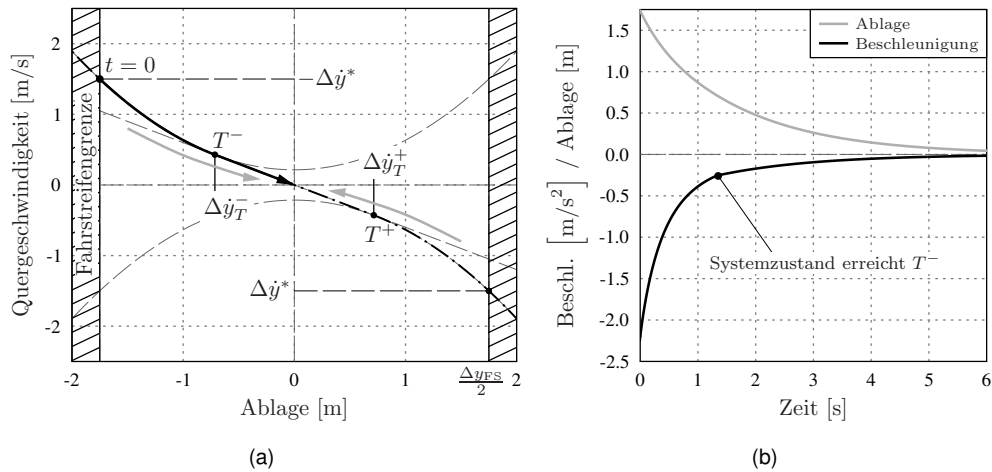


Abbildung 4.14: (a) Konstruktion der Schaltkurve zur Querregelung. (b) Verlauf der Ablage und der benötigten Querbeschleunigung zur Umsetzung einer Bewegung des Systemzustands entlang der Schaltkurve.

funktion die Möglichkeit bieten, unterschiedliche Dynamiken für Fahrzeugpositionen in der Nähe der Fahrstreifenmitte einerseits und an den Fahrstreifenbegrenzungen andererseits vorzugeben.

Ein derartiges Reglerverhalten ist mit einer linearen Schaltfunktion nicht ohne zusätzliche Maßnahmen umsetzbar. Um die Anforderungen zu erfüllen, wird eine Schaltfunktion vorgeschlagen, die sich vergleichbar mit der nichtlinearen Schaltfunktion aus Abschnitt 4.2.2 aus einem linearen Anteil und zwei Parabelabschnitten stückweise zusammensetzt. Die Konstruktion der Schaltkurve ist in Abbildung 4.14(a) veranschaulicht. Der lineare Anteil wird durch eine Gerade der Steigung m_{quer} beschrieben, die einen Schnittpunkt mit der Δy -Achse im Soll-Zustand ($\Delta y_{\text{soll}} = 0 \text{ m}$, $\Delta \dot{y}_{\text{soll}} = 0 \text{ m/s}$) besitzt. Entsprechend Gleichung (4.20) ergibt sich für eine Bewegung des Systemzustands auf diesem Abschnitt der Schaltkurve eine asymptotische Annäherung an den Wunschzustand. Durch die Geradensteigung kann eine Wichtung zwischen der Ausregelung von Querabweichungen oder der Korrektur der Fahrzeugausrichtung innerhalb des Fahrstreifens vorgenommen werden. Mit abnehmender Steigung wird dabei größeres Gewicht auf eine parallele Ausrichtung des Fahrzeugs entlang des Streckenverlaufs gelegt. Insbesondere im Bereich der Fahrstreifenmitte ist dieses Verhalten gewünscht. Nähert sich das Fahrzeug der Fahrstreifenbegrenzung, soll vorrangig die Querabweichung kompensiert werden. Dies wird durch den Übergang des Geradenstücks in eine nach oben bzw. nach unten geöffnete Parabel erreicht. Der Übergang erfolgt stetig differenzierbar in den beiden Tangentialpunkten T^- und T^+ . Zur Festlegung der Parabelverläufe wird der Parameter $\Delta \dot{y}^*$ eingeführt, der die Quergeschwindigkeit in Richtung der Fahrstreifenmitte bei Erreichen der Fahrstreifenbegrenzung darstellt. Unabhängig vom Verlauf des linearen Kurvenanteils kann dadurch die Stärke der Reaktion auf ein drohendes Verlassen des Fahrstreifens vorgegeben werden. Der Verlauf der Querbeschleunigung ist in Abbildung 4.14(b) dargestellt.

nigung, die aufgebracht werden muss, um eine Bewegung des Systemzustands entlang der Schaltkurve zu erreichen, ist in Abbildung 4.14(b) für ein Beispielmanöver dargestellt. Zu Beginn befindet sich das Fahrzeug an der Fahrstreifengrenze. Durch die Schaltfunktion wird hier eine verhältnismäßig große Quergeschwindigkeit in Richtung der Fahrstreifenmitte vorgegeben. Mit Annäherung an die Fahrstreifenmitte wird die Quergeschwindigkeit abgebaut. Dies spiegelt sich im Beschleunigungsverlauf durch einen starken Abfall der angeforderten Beschleunigung wider. Nach Erreichen des Tangentialpunktes T^- bewegt sich der Systemzustand im Phasenraum entlang eines Geradenabschnitts. Für die Beschleunigungsvorgabe im Zeitbereich bedeutet dies wiederum einen asymptotischen Verlauf, bis der Zielzustand erreicht ist. Der Verlauf der Ablage während des Manövers ist ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

Eine auf die beschriebene Weise konstruierte Schaltkurve lässt sich unter Berücksichtigung der Symmetrieeigenschaften durch die Schaltfunktion

$$s_{\text{quer}}(\Delta y, \Delta \dot{y}) = \begin{cases} m_{\text{quer}} \Delta y - \Delta \dot{y} & , \text{ für } |\Delta y| \leq \Delta y_T^+ \\ \text{sgn}(\Delta y) \left[a_{\text{quer}} \Delta y^2 + b_{\text{quer}} \right] - \Delta \dot{y} & , \text{ für } |\Delta y| > \Delta y_T^+ \end{cases} \quad (4.27)$$

mit der Signum-Funktion

$$\text{sgn}(\Delta y) = \begin{cases} -1 & , \text{ für } \Delta y < 0 \\ 1 & , \text{ für } \Delta y \geq 0 \end{cases}$$

darstellen. Dabei bezeichnet Δy_T^+ den Δy -Wert des Tangentialpunktes T^+ und lässt sich mit

$$\Delta y_T^+ = -\frac{\Delta \dot{y}^*}{m_{\text{quer}}} - \sqrt{\frac{\Delta \dot{y}^{*2}}{m_{\text{quer}}^2} - \frac{\Delta y_{\text{FS}}^2}{4}} \quad (4.28)$$

bestimmen. Diese Größe wird durch die Parameter der Geradensteigung m_{quer} , der Fahrstreifenbreite Δy_{FS} und der Quergeschwindigkeit $\Delta \dot{y}^*$ an der Fahrstreifenbegrenzung beeinflusst. Weiterhin ergibt sich daraus die Parabelstauchung

$$a_{\text{quer}} = \frac{m_{\text{quer}}}{2 \Delta y_T^+}$$

und die Verschiebung der Parabel entlang der $\Delta \dot{y}$ -Achse

$$b_{\text{quer}} = \frac{\Delta y_T^+ m_{\text{quer}}}{2},$$

die sich nur in ihrem Vorzeichen für die nach oben bzw. nach unten geöffnete Parabel unterscheidet.

Damit die Systembewegung entlang der Schaltkurve zu einem stabilen Verhalten führt, sollen positive Quergeschwindigkeiten für negative Ablagen und umgekehrt negative Quergeschwindigkeiten für positive Ablagen durch die Schaltkurve vorgegeben werden. Diese Bedingung lässt sich analog zu Gleichung (4.22) mit

$$s_{\text{quer}}(\Delta y) \Delta y < 0$$

ausdrücken. Für die Steigung des Geradenabschnitts muss demnach

$$m_{\text{quer}} < 0$$

gelten. Damit Gleichung (4.28) eine reelle Lösung besitzt, wird außerdem

$$\Delta y^* \leq \frac{\Delta y_{\text{FS}}}{2} m_{\text{quer}} \quad (4.29)$$

gefordert.

4.3.3 Regelgesetz (quer)

Nach der vorangegangenen Definition der Schaltfunktion und damit des gewünschten Systemverhaltens im Gleitzustand wird in diesem Abschnitt ein Regelgesetz hergeleitet, das die benötigte Querbeschleunigung zur Umsetzung dieser Vorgaben erzeugt. Wie schon im Falle der Abstandsregelung findet zunächst eine Untersuchung der Erreichbarkeit und Attraktivität der Schaltkurve unter dem Einfluss einer Relais-Regelung statt. Es ergeben sich Begrenzungen für die Wahl der Parameter bei der Konstruktion der Schaltkurve. Da die Relais-Regelung zu unkomfortablen Lenkeingriffen führt, wird eine Grenzschrift mit einer kontinuierlichen Approximation des schaltenden Regelgesetzes eingeführt. Bei der Querregelung ist eine möglichst exakte Regelung erwünscht. Aus diesem Grund wird das Regelgesetz um einen äquivalenten Regelungsanteil (vgl. Abschnitt 4.1.2) erweitert.

Erreichbarkeit und Attraktivität mit einem Relais-Regelgesetz

Für die Anwendung der Relais-Regelung wird von einer maximalen Querbeschleunigung \ddot{y}_{max} ausgegangen, die der Querregelung unter Berücksichtigung von Komfortaspekten zur Verfügung gestellt wird. Die Eingriffe für Beschleunigungen nach rechts bzw. nach links sind dabei betragsmäßig gleich, so dass sich das Schaltgesetz

$$\Delta \ddot{y}_{\text{soll}} = -\text{sgn}(s_{\text{quer}}(\Delta y)) \ddot{y}_{\text{max}} \quad (4.30)$$

mit der Soll-Querbeschleunigung $\Delta \ddot{y}_{\text{soll}}$ und dem Vorzeichen der Schaltfunktion s_{quer} an der Stelle Δy entsprechend Gleichung (4.27) angeben lässt. Die Untersuchung der Erreichbarkeit und Attraktivität unter dem Einfluss dieses Regelgesetzes kann anhand der in Abschnitt 4.2.3 angewandten Methode mittels einer Ljapunov-Kandidatenfunktion erfolgen. Alternativ werden im Folgenden diese Eigenschaften durch anschauliche Überlegungen bestimmt.

Die Erreichbarkeit und Attraktivität ist für diejenigen Bereiche auf der Schaltkurve gewährleistet, für die Systemtrajektorien von beiden Seiten auf der Schaltkurve enden. Ist dies nicht der Fall, existieren Systemtrajektorien, die den Systemzustand von der Schaltkurve weg führen. Auf der linken Seite von Abbildung 4.15 sind solche Bereiche für große Ablagen in der Umgebung der grau markierten Abschnitte der Schaltkurve erkennbar. Der

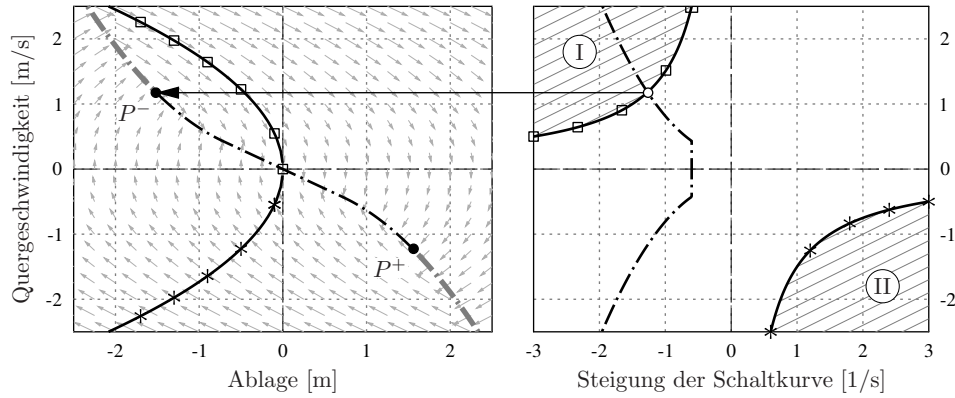


Abbildung 4.15: Bestimmung attraktiver Bereiche auf der Schaltkurve für die Querregelung.

attraktive Teil der Schaltkurve ist schwarz dargestellt und liegt zwischen den Punkten P^- und P^+ . Da sowohl das Regelgesetz als auch die Schaltfunktion symmetrisch sind, ist es ausreichend, einen dieser beiden Punkte zu bestimmen. Mit der gleichen Begründung ist es weiterhin ausreichend, nur Systemzustände oberhalb der Schaltkurve zu betrachten.³⁸ Im Falle negativer Ablagen ist ein Punkt $(\Delta y^\dagger, \Delta \dot{y}^\dagger = s_{\text{quer}}(\Delta y^\dagger))$ auf der Schaltkurve attraktiv, wenn die Steigung der Systemtrajektorie

$$\delta_{\text{traj}}(\Delta y^\dagger, \Delta \dot{y}^\dagger) = \frac{\partial}{\partial \Delta y} \text{traj}_{\text{quer}}(\Delta y^\dagger, \Delta \dot{y}^\dagger)$$

durch diesen Punkt einen kleineren, negativen Wert besitzt als die Steigung der Schaltkurve

$$\delta_s(\Delta y^\dagger) = \frac{\partial}{\partial \Delta y} s_{\text{quer}}(\Delta y^\dagger).$$

Für positive Ablagen muss umgekehrt gelten, dass die Steigung der Systemtrajektorie durch den betrachteten Punkt einen größeren, positiven Wert als die der Schaltkurve aufweist. Daraus ergibt sich die Bedingung

$$\begin{aligned} \delta_{\text{traj}}(\Delta y, \Delta \dot{y}) &\stackrel{!}{<} \delta_s(\Delta y), \text{ für } \Delta y < 0 \\ \wedge \quad \delta_{\text{traj}}(\Delta y, \Delta \dot{y}) &\stackrel{!}{>} \delta_s(\Delta y), \text{ für } \Delta y > 0. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Diese Bedingung ist in Abbildung 4.15 auf der rechten Seite graphisch veranschaulicht. Die Steigungen der Schaltkurve sowie der Systemtrajektorien werden hierbei auf der Abszisse aufgetragen. Die Ordinate entspricht der Quergeschwindigkeit und ist identisch mit der Ordinate des linken Graphen, so dass sich die Steigungen in Abhängigkeit von der

³⁸Ebenso wäre eine Betrachtung ausschließlich negativer bzw. ausschließlich positiver Ablagen mit Systemzuständen oberhalb und unterhalb der Schaltkurve ausreichend.

Quergeschwindigkeit direkt übertragen lassen. Aus dem Regelgesetz (4.30) ergeben sich als Systemtrajektorien nach links geöffnete Parabeln, die für unterschiedliche Anfangsbedingungen lediglich entlang der Δy -Achse verschoben sind (vgl. Abschnitt 4.1.2). Da sich weder die Form der Parabeln ändert, noch eine Verschiebung in Δy -Richtung erfolgt, ist die Steigung ausschließlich von der $\Delta \dot{y}$ -Komponente des Systemzustands abhängig und lässt sich mit

$$\delta_{\text{traj}}(\Delta \dot{y}) = -\frac{\ddot{y}_{\text{max}}}{\Delta \dot{y}}$$

bestimmen. Es ergeben sich die mit Quadraten bzw. Kreuzen markierten Steigungsverläufe für positive bzw. negative Quergeschwindigkeiten. Weiterhin erhält man aus Forderung (4.31) die schraffiert dargestellten Bereiche *I* und *II*. Abschnitte der Schaltkurve, deren Steigung innerhalb dieser Bereiche liegen, sind nicht attraktiv. Der Steigungsverlauf der beispielhaft dargestellten Schaltkurve ist strichpunktiert dargestellt. Da nach Gleichung (4.27) konstruierte Schaltfunktionen streng monoton fallend sind, ergeben sich für die gesamte Schaltkurve negative Werte. Somit befindet sich der gesamte Steigungsverlauf der Schaltkurve für beliebige Auslegungen außerhalb des Bereichs *II*. Jedoch verläuft die Ableitung der Schaltfunktion teilweise in Bereich *I*. Für diesen Abschnitt ist die Schaltkurve stärker gekrümmt als die Systemtrajektorien, so dass die Schaltkurve hier keine Attraktivität aufweist. Durch den Schnittpunkt der Steigungsverläufe ergibt sich eine Quergeschwindigkeit, aus der wiederum der Punkt P^- auf der Schaltkurve resultiert.

Diese Überlegungen lassen sich auf eine allgemeine Attraktivitätsuntersuchung unter der Voraussetzung einer nach Gleichung (4.27) konstruierten Schaltfunktion und einem Relais-Regelgesetz nach Gleichung (4.30) erweitern. Aufgrund der beschriebenen Symmetrie- und Monotonieeigenschaften der Schaltfunktion lässt sich die Attraktivitätsuntersuchung auf negative Ablagen und Systemzustände oberhalb der Schaltkurve beschränken. Dies entspricht dem Verlauf bzw. dem Steigungsverlauf der Schaltkurve im jeweils zweiten Quadranten der Graphen in Abbildung 4.15. Die Steigung der Schaltkurve ist in diesem Quadranten monoton steigend, während die Steigung der Systemtrajektorien streng monoton fallend ist. Wird im untersuchten Quadranten ein attraktiver Punkt auf der Schaltkurve gefunden, ist demnach auch der folgende Abschnitt in Richtung positiver Ablagen attraktiv. Für die in dieser Arbeit verwendeten Schaltkurven ist somit die Gewährleistung der Attraktivität an den Fahrstreifenbegrenzungen ausreichend, um für den gesamten relevanten Bereich der Schaltkurve Attraktivität sicherzustellen. Wird wie in den vorangegangenen Überlegungen die Untersuchung für negative Ablagen durchgeführt und wird weiterhin Bedingung (4.29) berücksichtigt, bedeutet dies eine Untersuchung des Punktes $\left(-\frac{\Delta y_{\text{FS}}}{2}, -\Delta y^*\right)$. Eine Schaltkurve mit einer bestimmten Konfiguration der Parameter Δy^* und $\Delta \dot{y}_{\text{max}}$ lässt sich dann mit der Bedingung

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \dot{y}}{\partial \Delta y} \{ \text{traj}_{\text{quer}}(-\Delta y^*) \} &\stackrel{!}{<} \frac{\partial \Delta \dot{y}}{\partial \Delta y} \{ s_{\text{quer}}(-\Delta y^*) \} \\ -\frac{\Delta \dot{y}_{\text{max}}}{\Delta y^*} &\stackrel{!}{<} -2 \sqrt{a_{\text{quer}} (\Delta y^* - b_{\text{quer}})} \end{aligned}$$

auf Attraktivität im Bereich des Fahrstreifens überprüfen. Die Fahrstreifenbreite nimmt hierbei über die Größen a_{quer} und b_{quer} Einfluss auf die Attraktivitätsbedingung.

Grenzschichtkonzept und äquivalente Regelung

Um die bei einer Relais-Regelung auftretenden hochfrequenten Schaltvorgänge zu vermeiden, wird wie schon bei der Abstandsregelung eine Grenzschicht um die Schaltkurve eingeführt. Innerhalb dieser Grenzschicht wird in Abhängigkeit vom Abstand zur Schaltkurve linear zwischen den beiden Stellgrößen \ddot{y}_{max}^+ und \ddot{y}_{max}^- interpoliert. Die Vorgabe des Grenzschichtverlaufs entspricht der Konstruktion der Schaltkurve, jedoch werden die Kurven zusätzlich um die Grenzschichtbreite Φ_{quer} entlang der $\Delta\dot{y}$ -Achse nach oben bzw. nach unten verschoben. Damit ergibt sich das Regelgesetz

$$\Delta\ddot{y}_{\text{soll}}(t) = \begin{cases} \ddot{y}_{\text{max}} (s_{\text{quer}}(\Delta y) / \Phi_{\text{quer}}) & , \text{ für } |s_{\text{quer}}| \leq \Phi_{\text{quer}} \\ -\text{sgn}(s_{\text{quer}}(\Delta y)) \ddot{y}_{\text{max}} & , \text{ für } |s_{\text{quer}}| > \Phi_{\text{quer}} . \end{cases} \quad (4.32)$$

Der bei der Anwendung dieses Regelgesetzes auftretende Quasi-*Sliding-Mode* führt zu einer Beeinträchtigung der Regelgenauigkeit. In Abbildung 4.16(a) ist das Richtungsfeld unter dem Einfluss einer beispielhaft ausgelegten Regelung dargestellt. Weiterhin sind zwei Manöver mit einer anfänglichen negativen Abweichung bei verschwindender Quergeschwindigkeit (Manöver A, durchgezogene Linie) bzw. positiver Quergeschwindigkeit (Manöver B, unterbrochene Linie) eingezeichnet. Bei beiden Manövern verläuft die Bewegung des Systemzustands zwar innerhalb der Grenzschicht, jedoch ergibt sich eine Systemtrajektorie, die von der Schaltkurve abweicht. Der Grund für diese Abweichung ist der aus dem Regelgesetz (4.32) resultierende Stellgrößenverlauf bei der Annäherung des Systemzustands an die Schaltkurve. Die erzeugte Soll-Querbeschleunigung wird demnach ab dem Eintritt in die Grenzschicht ausgehend vom Maximaleingriff $\pm\Delta\ddot{y}_{\text{max}}$ reduziert und nimmt für Systemzustände auf der Schaltkurve den Wert 0 m/s^2 an. Wie bereits in Abschnitt 4.1.2 festgestellt, ergeben sich für das untersuchte System bei verschwindenden Stellgrößen waagerechte Systemtrajektorien, die den Systemzustand im Allgemeinen nicht entlang der Schaltkurve führen. Dies ist in Abbildung 4.16(a) im vergrößert dargestellten Bereich verdeutlicht.

Im Vergleich zur Längsführung ist für die Quurführung des Fahrzeugs eine erhöhte Genauigkeit erforderlich.³⁹ Um den Einfluss der eingeführten Grenzschicht auf den Regelfehler zu kompensieren, wird deshalb die Regelung entsprechend Abschnitt 4.1.2 um einen äquivalenten Stellgrößenanteil erweitert. Dieser Anteil entspricht einer Vorsteuerung, durch die eine frühzeitige Orientierung der Systembewegung entlang der Schaltkurve erreicht wird. Abbildung 4.16(b) zeigt den Einfluss des äquivalenten Regelanteils auf das Richtungsfeld. Zur Verdeutlichung der Unterschiede sind die Richtungspfeile in Abhängigkeit von der

³⁹Abgesehen von kritischen Situationen sind bei der Längsführung komfortable Reglereingriffe der exakten Führung des Systemzustands entlang der Schaltkurve vorzuziehen.

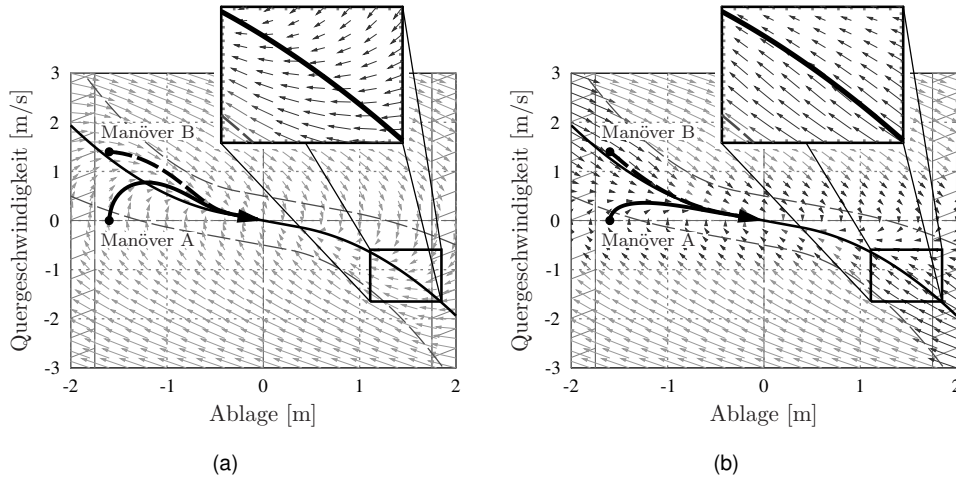


Abbildung 4.16: Vergleich unterschiedlicher Regelgesetze (a) ohne äquivalenten Regelungsanteil und (b) mit äquivalentem Regelungsanteil anhand der Richtungsfelder und simulierter Fahrmanöver.

Differenz zur Stellgröße ohne äquivalenten Anteil dunkler dargestellt.⁴⁰ Anhand der zuvor betrachteten Beispielmanöver wird die Anpassung an den Schaltkurvenverlauf durch die Aufschaltung des äquivalenten Anteils ersichtlich. Die Systembewegung erfolgt nach erstmaligem Erreichen entlang der Schaltkurve.

Die Berechnung des äquivalenten Regelanteils erfolgt entsprechend Gleichung (4.11) anhand von

$$\Delta \ddot{y}_{\Leftrightarrow}(\Delta \mathbf{y}) = - \left[\frac{\partial \mathbf{s}_{\text{quer}}}{\partial \Delta \mathbf{y}} \mathbf{B}_{\text{quer}} \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{s}_{\text{quer}}}{\partial \Delta \mathbf{y}} \mathbf{A}_{\text{quer}} \Delta \mathbf{y}$$

mit der Systemmatrix \mathbf{A}_{quer} bzw. der Eingangsmatrix \mathbf{B}_{quer} aus Gleichung (4.26) und der abschnittsweise definierten Schaltfunktion s_{quer} aus Gleichung (4.27). Für den linearen Bereich der Schaltfunktion ergibt dies

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{y}_{\Leftrightarrow}(\Delta \mathbf{y}) &= - \left\{ \begin{bmatrix} m_{\text{quer}} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} m_{\text{quer}} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta \mathbf{y} \\ &= m_{\text{quer}} \Delta \dot{y}. \end{aligned}$$

Entsprechend lässt sich der äquivalente Regelanteil für die nach oben geöffnete Parabel durch

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{y}_{\Leftrightarrow}(\Delta \mathbf{y}) &= - \left\{ \begin{bmatrix} -2 a_{\text{quer}} \Delta y & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \begin{bmatrix} -2 a_{\text{quer}} \Delta y & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta \dot{y} \end{bmatrix} \\ &= -2 a_{\text{quer}} \Delta y \Delta \dot{y} \end{aligned}$$

⁴⁰Der Maximalwert der Stellgröße ist für beide Regelungen identisch.

beschreiben. Unter Berücksichtigung der Symmetrie der Schaltfunktion ergibt sich damit das äquivalente Stellsignal zu

$$\Delta \ddot{y}_{\Leftrightarrow}(\Delta y) = \begin{cases} m_{\text{quer}} \Delta \dot{y} & , \text{ für } |\Delta y| \leq \Delta y_T^+ \\ -\text{sgn}(\Delta y) \left[-2 a_{\text{quer}} \Delta y \Delta \dot{y} \right] & , \text{ für } |\Delta y| > \Delta y_T^+ . \end{cases}$$

Aus der Überlagerung des äquivalenten Anteils mit dem Ausgangssignals des Regelgesetzes (4.32) erhält man

$$\Delta \ddot{y}_{\text{soll}}^{\Leftrightarrow}(t) = \Delta \ddot{y}_{\Leftrightarrow} + \Delta \ddot{y}_{\text{soll}}$$

als resultierende Soll-Beschleunigung für die Querregelung.

4.3.4 Parametrierung (quer)

Durch die Auslegung der Schaltkurve und der Grenzschicht um die Schaltkurve können unterschiedliche Verhaltensweisen bei der Querführung realisiert werden. Im Folgenden werden extreme Parametrierungen vorgestellt, die anhand von zwei simulierten Fahrmanövern veranschaulicht werden:

- Zu Beginn von *Manöver C* befindet sich das Fahrzeug nahe der Fahrstreifengrenze. Die anfängliche Quergeschwindigkeit wird derart gewählt, dass sich der Systemzustand auf der Schaltkurve befindet. Durch das im vorherigen Abschnitt hergeleitete Regelgesetz erfolgt die Systembewegung entlang der Schaltkurve. Das Manöver ist damit geeignet, die aus der Parametrierung der Schaltkurve resultierende Fahrzeugbewegung abzuschätzen.
- *Manöver D* besitzt für beide Parametrierungen die gleichen Anfangsbedingungen. Ausgehend von einer positiven Ablage von einem Meter und einer Quergeschwindigkeit von 1,2 m/s wird der Systemzustand entsprechend dem Regelgesetz in Richtung der Schaltkurve geführt. Nach Erreichen der Schaltkurve erfolgt die Systembewegung entlang der Schaltkurve bis in den Zielzustand. Anhand des Manövers kann die Systemreaktion auf eine kritische Fahrsituation untersucht werden.

Mittenführung

Die in Abbildung 4.17 dargestellte Reglerauslegung bewirkt eine schnelle Kompensation von Querabweichungen bezüglich der Fahrstreifenmitte. Auf der linken Seite der Abbildung ist eine Phasenraumdarstellung des Schaltkurvenverlaufs mit Grenzschicht abgebildet. Außerdem sind die Systemtrajektorien für die beiden Beispielmanöver eingezeichnet. Die zeitliche Änderung der Ablage im Verlauf der Manöver ist auf der rechten Seite der Abbildung dargestellt. Entsprechend dem Schaltkurvenverlauf erfolgt zu Beginn des Manövers C eine rasche Annäherung an die Fahrstreifenmitte, die nach ungefähr einer Sekunde in eine asymptotische Annäherung übergeht. Das Fahrzeug befindet sich nach ca. 6 s in unmittelbarer Nähe zur Fahrstreifenmitte. Zu Beginn des Manövers D nähert sich das

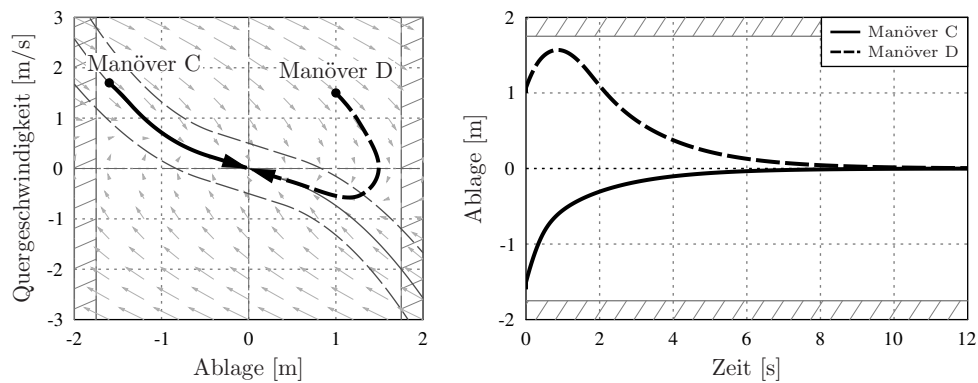


Abbildung 4.17: Parametrierung der *Sliding-Mode*-Regelung zur Mittenführung mit schneller Kompensation von Querabweichungen.

Fahrzeug aufgrund der anfänglichen Quergeschwindigkeit der Fahrstreifenbegrenzung an. Durch den Reglereingriff wird zunächst die Quergeschwindigkeit abgebaut. In der Phasenraumdarstellung entspricht dies dem Anteil der Systemtrajektorie vom Anfangszustand bis zum Schnittpunkt mit der Δy -Achse. Anschließend erfolgt eine aus der äquivalenten Regelung resultierende, frühzeitige Anpassung der Systembewegung an den Schaltkurvenverlauf. Anhand des zeitlichen Verlaufs der Ablage ist ein Abbau der Quergeschwindigkeit bis ungefähr eine Sekunde nach Manöverbeginn und das Erreichen der Fahrstreifenmitte nach ca. 8 s erkennbar.

Parallelführung

Während durch die vorangegangene Parametrierung eine rasche Kompensation von Abweichungen von der Fahrstreifenmitte angestrebt wurde, erfolgt nun die Reglerauslegung mit dem vorrangigen Ziel, das Fahrzeug parallel zur Fahrbahn auszurichten. In Abbildung 4.18 ist der Verlauf der Schaltkurve mit Grenzschicht und der zeitliche Verlauf der Fahrzeugablage für die Beispielmanöver dargestellt. Im Vergleich zur vorherigen Auslegung weist die Schaltkurve einen flacheren Verlauf auf. Für Manöver C resultiert hieraus eine langsame Annäherung an die Fahrstreifenmitte, die nach ungefähr 12 s abgeschlossen ist. Für Manöver D erhält man zunächst ein vergleichbares Verhalten wie bei der Mittenführung. Nach Erreichen der Grenzschicht folgt die Systembewegung jedoch auch in diesem Fall der flach verlaufenden Schaltkurve, wodurch sich wiederum ein langsames Annähern an die Fahrstreifenmitte ergibt. Das durch die Auslegung der Schaltkurve erreichte sanfte Ausregeln der Querabweichung entspricht dabei geringen Quergeschwindigkeiten und damit gleichzeitig einer stärkeren Parallelführung bezüglich des Fahrstreifenverlaufs.

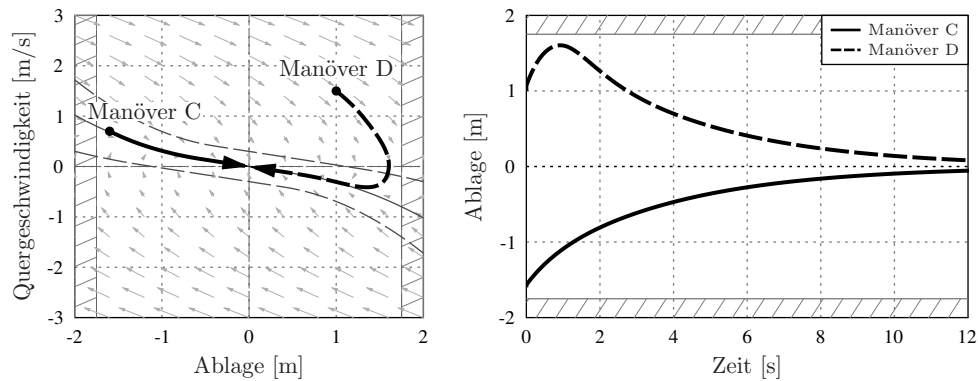


Abbildung 4.18: Parametrierung der *Sliding-Mode*-Regelung zur Parallelführung mit frühzeitiger Ausrichtung des Fahrzeugs parallel zum Fahrbahnverlauf.

4.4 Integrierte Längs- und Querregelung

In den Abschnitten 4.2 und 4.3 wurden *Sliding-Mode*-Regelungen zur automatisierten Längs- bzw. Querführung entworfen. Durch den parallelen Betrieb dieser beiden Regelsysteme lässt sich ein Assistenzsystem realisieren, das den Fahrer bei Fahrten auf Autobahnen oder gut ausgebauten Landstraßen entlastet. Eine Wechselwirkung zwischen den beiden Teilsystemen sieht dieser Ansatz jedoch nicht vor. Um die Quersituation bei der Längsführung und umgekehrt die Längssituation bei der Querführung zu berücksichtigen, wird im folgenden Abschnitt ein *Sliding-Mode*-Ansatz für eine integrierte Fahrzeugführung in Längs- und Querrichtung vorgestellt. Wegen der gleichzeitigen Betrachtung der Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs erfolgt der Reglerentwurf im Vergleich zu den bisherigen Regelungen in einem höherdimensionalen Zustandsraum.

Abschnitt 4.4.1 beschreibt die Anforderungen an eine integrierte Längs- und Querführung. In diesem Zusammenhang wird ein Szenario vorgestellt, bei dem die Vorteile des integrierten Ansatzes gegenüber dem parallelen Betrieb einer Längs- und einer Querführung deutlich werden. Für die Anwendung der integrierten Regelung werden weiterhin Überlegungen bezüglich der Wechselwirkungen zwischen der Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs angestellt.

In Abschnitt 4.4.2 wird eine Soll-Trajektorie zwischen zwei Punkten im Zustandsraum konstruiert, die das gewünschte Fahrzeugverhalten in Längs- und Querrichtung beschreibt. Dieser allgemeine Ansatz wird anhand eines Beispielszenarios veranschaulicht. Durch den Entwurf geeigneter Schaltflächen wird ein Gleitzustand des geregelten Systems herbeigeführt, in dem sich der Systemzustand entlang der Soll-Trajektorie bewegt.

Abschnitt 4.4.3 beschreibt die Herleitung eines Regelgesetzes zur Erzeugung von Soll-Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung. Durch die Beschleunigungsvorgaben wird der Systemzustand in Richtung der Schaltflächen geführt.

Abschließend werden in Abschnitt 4.4.4 zwei unterschiedliche Parametrierungen des Regelsystems vorgestellt. Anhand eines Manövers mit Störeinfluss werden die charakteristischen Systemreaktionen und die erzeugten Stellgrößen untersucht.

4.4.1 Überlegungen zur integrierten Längs- und Querführung

Anforderungen

Durch die Integration der Längs- und Querführung lässt sich die Funktionalität und das Einsatzspektrum des Assistenzsystems erweitern. Werden bei der Fahrzeugführung sowohl die Längs- als auch die Quersituation berücksichtigt, können gegenüber parallel geschalteten Systemen ohne Wechselwirkung komplexere Verkehrssituationen behandelt werden. Als einfaches Beispiel einer solchen Verkehrssituation kann die Reduktion der Geschwindigkeit beim Durchfahren einer stark gekrümmten Kurve angeführt werden. Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise des in diesem Abschnitt hergeleiteten, integrierten Regelungsansatzes wird jedoch ein komplexeres Szenario gewählt. In dem gewählten Szenario führt das geregelte Fahrzeug ausgehend von einer stationären Folgefahrt einen Fahrstreifenwechsel durch. Das Vorderfahrzeug besitzt gegenüber der eingestellten Wunschgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs eine geringere Geschwindigkeit, so dass im Verlauf des Manövers neben einer Beschleunigung in Querrichtung ebenfalls eine positive Beschleunigung in Längsrichtung erwünscht ist. Durch die Koordination der Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs soll ein angemessener Sicherheitsabstand bezüglich des Vorderfahrzeugs⁴¹ eingehalten werden. Da das im Folgenden dargestellte System einer Komfortsteigerung bei Fahrten auf gut ausgebauten Straßen dienen soll, wird gefordert, dass während der Regeltätigkeit keine unkomfortablen Beschleunigungen oder Beschleunigungsänderungen auftreten.

Anwendung der *Sliding-Mode-Regelung*

Wie schon bei den vorangegangenen Einzelbetrachtungen der Längs- und der Querführung wird auch für den folgenden Reglerentwurf von einer vernachlässigbaren Aktordynamik ausgegangen. Der Regler ist auf einer übergeordneten Ebene angesiedelt und erzeugt als Stellgrößen Soll-Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung. Die Umsetzung dieser Vorgaben erfolgt auf Ebene der in Abschnitt 4.5 umrissenen unterlagerten Beschleunigungsregelungen. Aus der Kombination der zuvor betrachteten Teilsysteme der Längs-

⁴¹Um Kollisionen mit Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen zu vermeiden, sind zusätzliche Sensoren zur Überwachung des seitlichen und rückwärtigen Verkehrs notwendig. Dies wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

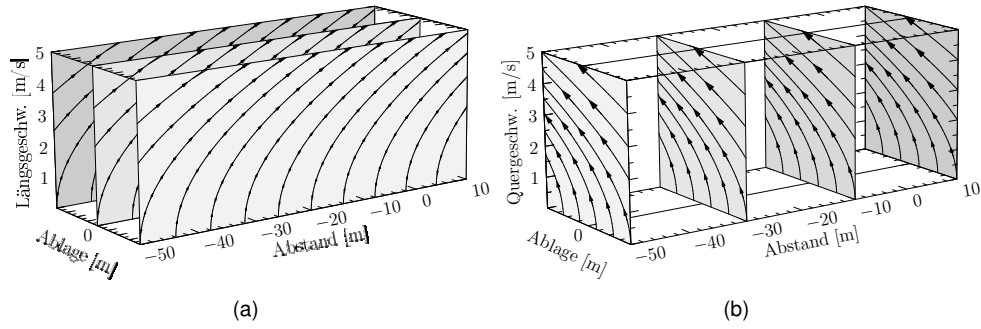


Abbildung 4.19: Systemtrajektorien unter dem Einfluss einer (a) Längsbeschleunigung bei verschwindender Quergeschwindigkeit und Querbewegung, (b) Querbewegung bei verschwindender Längsbeschleunigung und Längsgeschwindigkeit.

und Querbewegung ergibt sich für den Reglerentwurf das Mehrgrößensystem mit der Zustandsraumdarstellung

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \ddot{x} \\ \Delta \dot{y} \\ \Delta \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \dot{x} \\ \Delta y \\ \Delta \dot{y} \end{bmatrix}}_{\chi(t)} + \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{x}_{\text{soll}} \\ 0 \\ \ddot{y}_{\text{soll}} \end{bmatrix}.$$

Der wesentliche Beitrag dieser gleichzeitigen Betrachtung ist der Übergang zu einem vierdimensionalen Zustandsvektor $\chi(t)$, bestehend aus dem Abstand zum Vorderfahrzeug Δx , der relativen Längsgeschwindigkeit bezüglich des Vorderfahrzeugs $\Delta \dot{x}$, der Ablage von der Fahrstreifenmitte Δy und der Quergeschwindigkeit bezüglich des Fahrstreifens $\Delta \dot{y}$. Aus der Wahl des Zustandsraums resultieren Schwierigkeiten bei der Veranschaulichung⁴² des Reglerentwurfs. Ein Einblick gelingt durch die Darstellung in zwei dreidimensionalen Graphen unter der Annahme bestimmter Randbedingungen.

In Abbildung 4.19 wird beispielsweise das bereits für den zweidimensionalen Fall untersuchte Verhalten eines Doppelintegratorsystems (vgl. Abschnitt 4.1.2) auf den vorliegenden vierdimensionalen Fall zweier Doppelintegratoren erweitert. Abbildung 4.19(a) zeigt die Systembewegung unter dem Einfluss einer konstanten Längsbeschleunigung bei verschwindender Querbewegung und Quergeschwindigkeit. Zur Darstellung wurde der durch Δx , Δy und $\Delta \dot{x}$ aufgespannte Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta \dot{x}}$ gewählt. Es ergeben sich in Richtung positiver Abstände geöffnete Parabeln. Anhand der Untersuchung bei unterschiedlichen Werten der Ablage ist ersichtlich, dass die Ablage unter den beschriebenen Randbedingungen keinen Einfluss auf die Systemtrajektorien hat. Außerdem sei darauf hingewiesen, dass der Einfluss einer Querbewegung zwar durch die Änderung der Ablage

⁴²Hauptsächlich dadurch bedingt, dass das menschliche Gehirn sehr lange Zeit lediglich mit drei Dimensionen konfrontiert wurde.

in diesem Raum beobachtet werden könnte, die Zustandsgröße der Quergeschwindigkeit jedoch nicht explizit dargestellt wird. Die Betrachtung des Einflusses einer konstanten positiven Querbewegung bei verschwindender relativer Längsbewegung und -geschwindigkeit erfolgt in Abbildung 4.19(b). Der hier zur Darstellung gewählte Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta y}$ umfasst die Zustandsgrößen Δx , Δy und $\Delta \dot{y}$, ohne dass die Längsgeschwindigkeit explizit auftritt. Als Systemtrajektorien ergeben sich in Richtung positiver Ablagen geöffnete Parabeln, die unabhängig vom Abstand zum Vorderfahrzeug sind.

Die gleichzeitige Wirkung von Längs- und Querbewegungen führt zu einer Systemtrajektorie im Zustandsraum, die anhand zweier Graphen entsprechend Abbildung 4.19 veranschaulicht werden kann.

4.4.2 Definition des Soll-Verhaltens (integriert)

In Abschnitt 4.4.1 wurde das Wunschverhalten für das untersuchte Manöver qualitativ beschrieben. Dieser allgemeinen Beschreibung folgt nun eine konkrete Auslegung der Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs durch die Vorgabe eines Gleitzustands. Dieser bestimmt den Übergang des Systemzustands aus dem Anfangszustand χ_0 zum Zeitpunkt $t = 0$ s in einen Endzustand χ_Ω zum Zeitpunkt $t = t_\Omega$. Die Transition erfolgt auf der Soll-Trajektorie $\chi_{\text{ref}}(t)$. Die Soll-Trajektorie sowie der Anfangs- und Endzustand setzen sich dabei aus den Komponenten

$$\begin{aligned}\chi_{\text{ref}}(t) &= [\Delta x_{\text{ref}}(t) \quad \Delta \dot{x}_{\text{ref}}(t) \quad \Delta y_{\text{ref}}(t) \quad \Delta \dot{y}_{\text{ref}}(t)]^T, \\ \chi_0(t=0) &= [\Delta x_0 \quad \Delta \dot{x}_0 \quad \Delta y_0 \quad \Delta \dot{y}_0]^T \text{ und} \\ \chi_\Omega(t=t_\Omega) &= [\Delta x_\Omega \quad \Delta \dot{x}_\Omega \quad \Delta y_\Omega \quad \Delta \dot{y}_\Omega]^T\end{aligned}$$

zusammen. Als Vorgabe für die Fahrzeuglängsbewegung wird in der vorliegenden Arbeit eine konstante Beschleunigung festgelegt, die sich aus der Differenz zwischen der Anfangsrelativgeschwindigkeit $\Delta \dot{x}_0$ und der vorgegebenen Relativgeschwindigkeit im Endzustand $\Delta \dot{x}_\Omega$ sowie der zur Verfügung stehenden Wegstrecke $\Delta x_\Omega - \Delta x_0$ mit

$$\Delta \ddot{x}(t) \equiv \Delta \ddot{x}_{\text{ref}} = \frac{\Delta \dot{x}_\Omega^2 - \Delta \dot{x}_0^2}{2 (\Delta x_\Omega - \Delta x_0)}$$

bestimmen lässt. Den zeitlichen Verlauf der Relativgeschwindigkeit und des Abstands zum Vorderfahrzeug erhält man durch sukzessive Integration:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x}_{\text{ref}}(t) &= \Delta \dot{x}_0 + \Delta \ddot{x}_{\text{ref}} t \\ \Delta x_{\text{ref}}(t) &= \Delta x_0 + \Delta \dot{x}_0 t + \frac{1}{2} \Delta \ddot{x}_{\text{ref}} t^2.\end{aligned}\tag{4.33}$$

Die Vorgabe der Querbewegung erfolgt ebenfalls durch die Festlegung einer Querbewegung. Um Beschleunigungssprünge zu vermeiden, wird in dieser Arbeit ein sinusförmiger Verlauf nach

$$\Delta \ddot{y}_{\text{ref}}(t) = \ddot{y}_{\text{max}} \sin(\omega t)$$

definiert. Diese Wahl wird durch Untersuchungen menschlichen Fahrverhaltens, z. B. von Tijerina und Hetrick (1996), zusätzlich motiviert. Der Parameter \ddot{y}_{\max} bezeichnet die maximale, während des Manövers auftretende Querbeschleunigung. Ein weiterer Parameter ist die Winkelgeschwindigkeit ω , der sich auf die Änderungsgeschwindigkeit der Soll-Beschleunigungsvorgabe auswirkt. Bei geeigneter Wahl der beiden Parameter ergeben sich nach einer Sinus-Periode mit einer durch t_{Ω} bestimmten Dauer die gewünschten Zustände in Querrichtung. Die Quergeschwindigkeit und Ablage lassen sich durch Integration und unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen mit

$$\begin{aligned}\Delta\dot{y}_{\text{ref}}(t) &= -\frac{\ddot{y}_{\max}}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{\ddot{y}_{\max}}{\omega} + \Delta\dot{y}_0 \\ \Delta y_{\text{ref}}(t) &= -\frac{\ddot{y}_{\max}}{\omega^2} \sin(\omega t) + \left(\frac{\ddot{y}_{\max}}{\omega} + \Delta\dot{y}_0 \right) t + \Delta y_0\end{aligned}\quad (4.34)$$

angeben.

Die zeitlichen Verläufe der Zustandsgrößen eines derart vorgegebenen Manövers sind in Abbildung 4.20 abgebildet. Beispielhaft wurde eine Änderung der Relativgeschwindigkeit in Längsrichtung von 0 m/s auf 10 m/s und ein Querversatz von 3,5 m vorgegeben. Der Abstand zum Vorderfahrzeug beträgt zu Beginn 40 m. Auf Höhe des Vorderfahrzeugs soll das Manöver abgeschlossen sein. Abbildung 4.20(a) zeigt den zeitlichen Verlauf der Zustandsgrößen in Längsrichtung, während in Abbildung 4.20(b) die Zustandsgrößen in Querrichtung dargestellt sind.

Die Definition des in Abbildung 4.20 veranschaulichten Soll-Verhaltens erfolgte in Form zeitlicher Verläufe. Um eine Untersuchung der resultierenden Soll-Trajektorie im Zustandsraum zu ermöglichen, wird im Folgenden die Zeit als freier Parameter durch den Abstand zum Vorderfahrzeug substituiert. Aus Gleichung (4.33) ergibt sich hierzu

$$t(x) = \frac{1}{\ddot{x}_{\text{ref}}} \left(-\dot{x}_0 + \sqrt{\dot{x}_0^2 - 2\ddot{x}_{\text{ref}}(x_0 - x)} \right).$$

Als abstandsbezogene Größen erhält man für die Relativgeschwindigkeit in Längsrichtung, die Querbeschleunigung und -geschwindigkeit sowie für die Ablage die in Abbildung 4.21 dargestellten Zustandsverläufe. Gegenüber den zeitbezogenen Verläufen ist eine Stauung zu Beginn des Manövers erkennbar, die mit zunehmender Längsgeschwindigkeit in eine Streckung über geht.

Aus den abstandsbezogenen Zustandsverläufen ergibt sich eine Soll-Trajektorie im Zustandsraum, die sich wiederum in zwei Graphen in den Teilräumen $\mathcal{R}_{\Delta\dot{x}}$ bzw. $\mathcal{R}_{\Delta\dot{y}}$ veranschaulichen lässt. In Abbildung 4.22 ist die Soll-Trajektorie für das zuvor beschriebene Beispielmanöver dargestellt. Um die Lage der Trajektorie in den beiden dreidimensionalen Räumen deutlich zu machen, sind in der Abbildung Flächen eingezeichnet, auf denen die Bewegung des Systemzustands erfolgt. Zur Konstruktion der Flächen werden zunächst die Projektionen der Soll-Trajektorie in die Δx - $\Delta \dot{x}$ -Ebene bzw. Δx - $\Delta \dot{y}$ -Ebene gebildet. Die Flächen ergeben sich aus der Extrusion dieser Projektionen in Richtung der Δy -Achse.

4.4 Integrierte Längs- und Querregelung

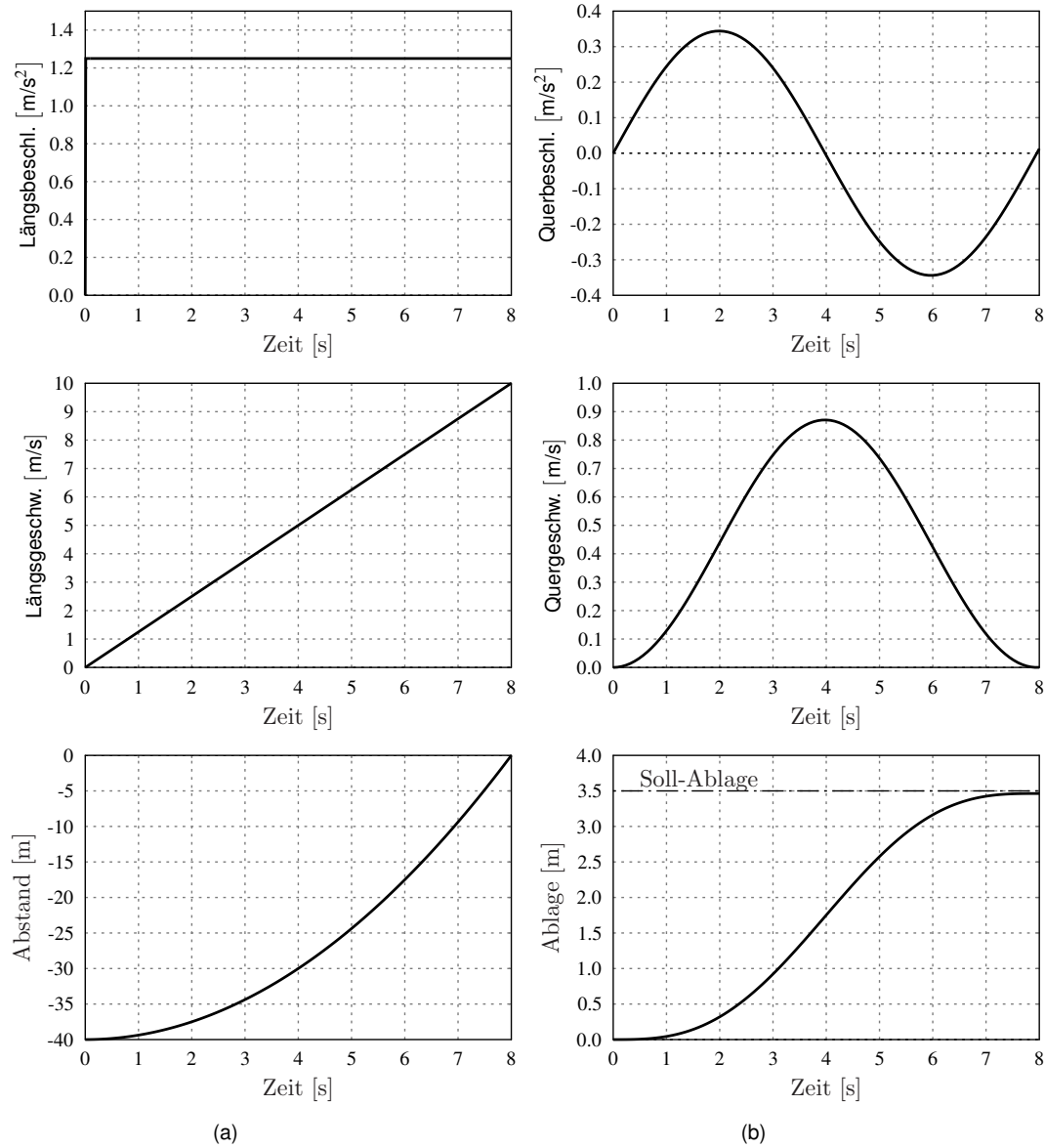


Abbildung 4.20: Zeitlicher Verlauf des gewünschten Fahrzeugverhaltens während eines Überholmanövers mit Längsbeschleunigung. (a) Zustandsgrößen in Längsrichtung: Längsbeschleunigung (oben), relative Längsgeschwindigkeit (Mitte) und Abstand (unten). (b) Zustandsgrößen in Querrichtung: Querbeschleunigung (oben), Quergeschwindigkeit (Mitte) und Ablage (unten).

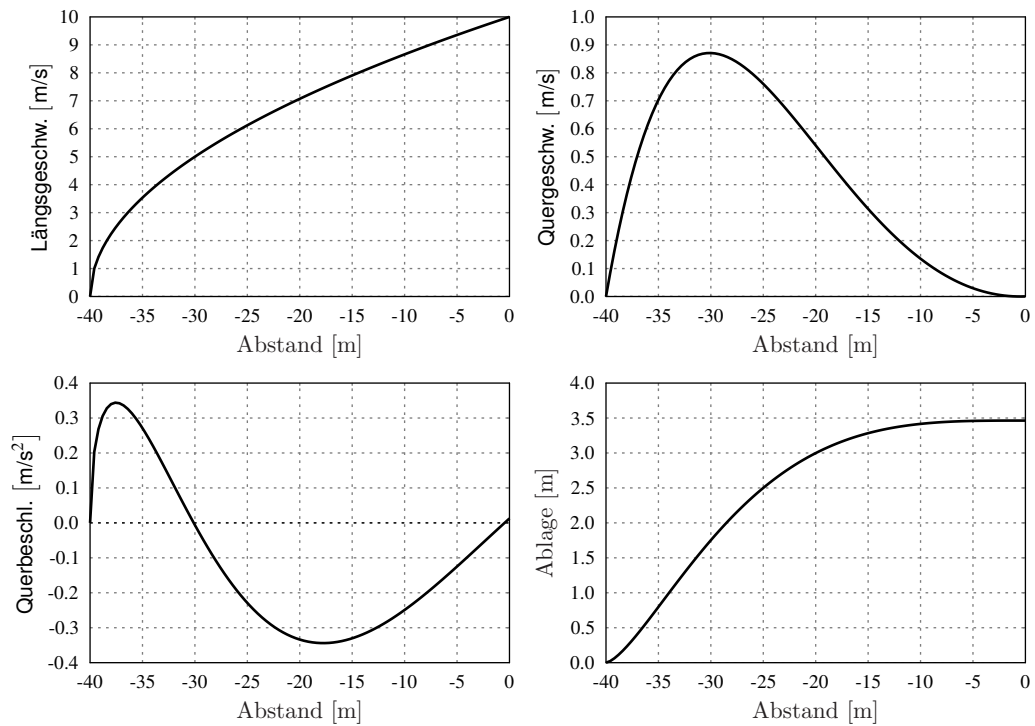


Abbildung 4.21: Auf den Abstand bezogene Zustandsgrößen für die gewünschte Fahrzeugbewegung: Längsgeschwindigkeit (links-oben), Querbeschleunigung (links-unten), Quergeschwindigkeit (rechts-oben), Querablage (rechts-unten).

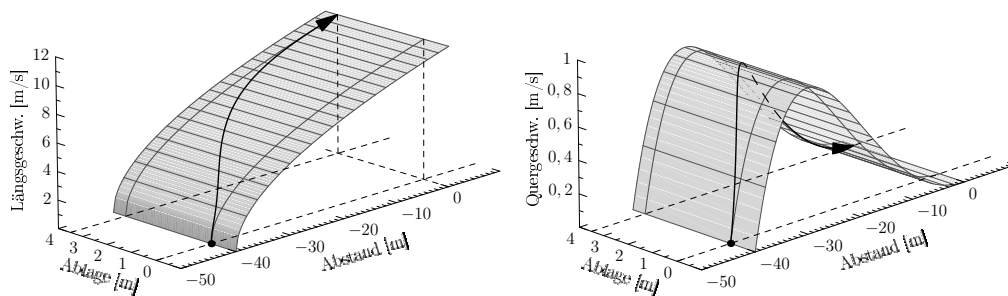


Abbildung 4.22: Verlauf der vierdimensionalen Soll-Trajektorie in den dreidimensionalen Teilräumen $\mathcal{R}_{\Delta\dot{x}}$ und $\mathcal{R}_{\Delta\dot{y}}$.

Entwurf der Schaltflächen

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Soll-Trajektorie führt aus einem gegebenen Anfangszustand in einen gewünschten Endzustand. Es wird nun eine Schaltfunktion gesucht, die im Sinne einer *Sliding-Mode*-Regelung einen Gleitzustand bewirkt, in dem der vierdimensionale Systemzustand entlang dieser Soll-Trajektorie geführt wird. Während bei den zuvor angestellten Einzelbetrachtungen der Längs- bzw. der Querverführung die Schaltfunktion der *Sliding-Mode*-Regelung durch eine Kurve im zweidimensionalen Zustandsraum dargestellt werden konnte, liegt im Falle der integrierten Betrachtung ein vierdimensionaler Zustandsraum mit zwei Stellgrößen vor. Die gesuchten Schaltfunktionen führen also auf Schalthyperflächen, deren Projektionen $S_{\Delta\dot{x}}$ bzw. $S_{\Delta\dot{y}}$ entsprechend Abschnitt 4.4.1 in den Teilräumen $\mathcal{R}_{\Delta\dot{x}}$ bzw. $\mathcal{R}_{\Delta\dot{y}}$ durch die Funktionen $s_{\Delta\dot{x}}(\chi(t))$ und $s_{\Delta\dot{y}}(\chi(t))$ beschrieben werden. Dabei ist zu gewährleisten, dass die Bewegung des Systemzustands auf den Schaltflächen für beliebige Anfangszustände in Richtung der Soll-Trajektorie führt.

Im Folgenden werden Konfigurationen der Schaltflächen anhand von drei beispielhaften Manövern mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen untersucht. Als Soll-Trajektorie dient der oben entworfene Übergang aus dem Startzustand $\chi_0 = [-40 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ in den Zielzustand $\chi_\Omega = [0 \ 3,5 \ 10 \ 0]^T$. Der Anfangszustand für Manöver A entspricht χ_0 und stellt somit die ideale Anfangsbedingung für das geplante Manöver dar. Wie Manöver A beginnt Manöver B in einem Abstand von 40 m. Allerdings weist der Anfangszustand eine Querabweichung bezüglich der Soll-Trajektorie von 1 m auf. Manöver C beginnt in einem Abstand von 35 m bei einer Ablage von 0 m, wodurch sich ein negativer Ablagefehler bezüglich der Soll-Trajektorie ergibt. Da die Bewegung des Systemzustands auf den Schaltflächen untersucht werden soll, werden die Zustände der relativen Längs- und Quergeschwindigkeit derart angepasst, dass sich der Anfangszustand auf den Schaltflächen befindet.

Als Ausgangsbasis für den Entwurf der Schaltflächen werden die bereits in Abbildung 4.22 zur Veranschaulichung der Soll-Trajektorie verwendeten Projektionen gewählt. Wird davon ausgegangen, dass die Bewegung des Systemzustands durch den Eingriff eines geeigneten Regelgesetzes auf die Schaltflächen beschränkt ist, ergeben sich die in Abbildung 4.23 dargestellten Richtungsfelder. Die Länge der Pfeile entspricht dem Betrag der Geschwindigkeit im jeweils betrachteten Punkt des Zustandsraums. Neben den Richtungspfeilen auf den Projektionen der Schaltflächen ist die Projektion des Richtungsfelds in die Δx - Δy -Ebene abgebildet. Für Manöver A ist ersichtlich, dass die resultierende Systembewegung entlang der Soll-Trajektorie verläuft. Für die Manöver B und C mit von der Soll-Trajektorie abweichenden Anfangsbedingungen ergeben sich parallel zur Soll-Trajektorie verlaufende Systembewegungen. Die untersuchten Schaltflächen führen zu einer Steuerung, mit der sich der qualitative Verlauf der Soll-Trajektorie umsetzen lässt. Abweichungen von der Soll-Trajektorie werden jedoch nicht ausgeglichen, so dass die untersuchten Schaltflächen für eine Regelung ungeeignet sind.

Um eine Regelung zu erhalten, die Abweichungen des Systemzustands von der Soll-Trajektorie kompensiert, werden die Schaltflächen geneigt. Zunächst wird eine Neigung der

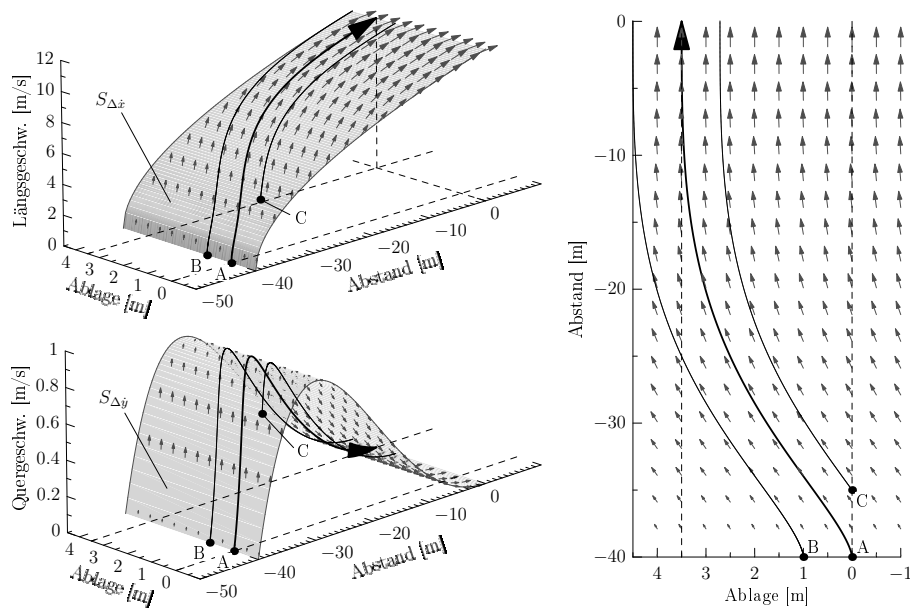


Abbildung 4.23: Richtungsfeld der *Sliding-Mode*-Regelung bei nicht geneigten Schaltflächen und resultierende Systemtrajektorien für unterschiedliche Anfangsbedingungen.

Schaltfläche $S_{\Delta\dot{y}}$ entsprechend Abbildung 4.24 untersucht.⁴³ Die Soll-Trajektorie verläuft dabei weiterhin auf der Schaltfläche. Für Manöver A mit idealen Ausgangsbedingungen erfolgt die Systembewegung entlang der Soll-Trajektorie. Im Gegensatz zu der zuvor betrachteten Schaltflächenauslegung wird durch die Neigung der Schaltfläche gewährleistet, dass bei Ablagefehlern bezüglich der Soll-Trajektorie geeignete Quergeschwindigkeiten eingestellt werden. Weicht der momentane Systemzustand in Richtung positiver Ablagen von der Soll-Trajektorie ab (Manöver B), wird durch $S_{\Delta\dot{y}}$ eine geringere Quergeschwindigkeit vorgegeben als die entsprechende Quergeschwindigkeit, die benötigt wird, um der Soll-Trajektorie zu folgen. Bei entgegengesetzten Abweichungen (Manöver C) werden größere Quergeschwindigkeiten als auf der Soll-Trajektorie vorgegeben. Auf diese Weise wird der Systemzustand von beiden Seiten in Richtung der Soll-Trajektorie geführt.

Die soeben betrachtete Auslegung der Schaltflächen hatte eine Anpassung der Quergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Abweichung des Systemzustands von der Soll-Trajektorie zur Folge. Um die vorgegebene Quergeschwindigkeit einzustellen, erfolgt als Fahrzeugreaktion letztendlich ein Lenkeingriff. Eine Reaktion in Längsrichtung ergibt sich analog für eine Schaltflächenkonfiguration, die eine Neigung der Schaltfläche $S_{\Delta\dot{x}}$ entsprechend Abbildung 4.25 bewirkt.⁴⁴ Bei positiven Ablagefehlern (Manöver B) wird durch die betrachtete Auslegung der Schaltflächen eine größere Längsgeschwindigkeit vorgegeben

⁴³Um die Anschaulichkeit der Abbildung zu verbessern, wurde eine Skalierung der $\Delta\dot{y}$ -Achse vorgenommen. Die Schaltfläche erscheint deswegen gegenüber den vorherigen Betrachtungen gestaucht.

⁴⁴Zur Veranschaulichung ist die Schaltfläche $S_{\Delta\dot{y}}$ nicht geneigt, d. h. auf Querabweichungen von der Soll-Trajektorie erfolgt keine Reaktion durch einen Lenkeingriff.

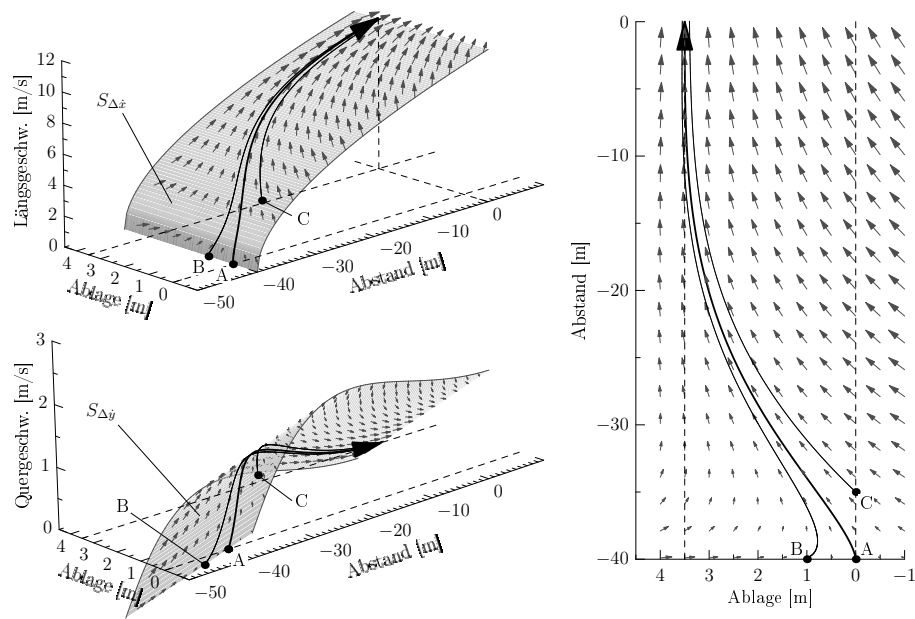


Abbildung 4.24: Richtungsfeld der *Sliding-Mode*-Regelung bei geneigter Schaltfläche $S_{\Delta y}$ und resultierende Systemtrajektorien für unterschiedliche Anfangsbedingungen.

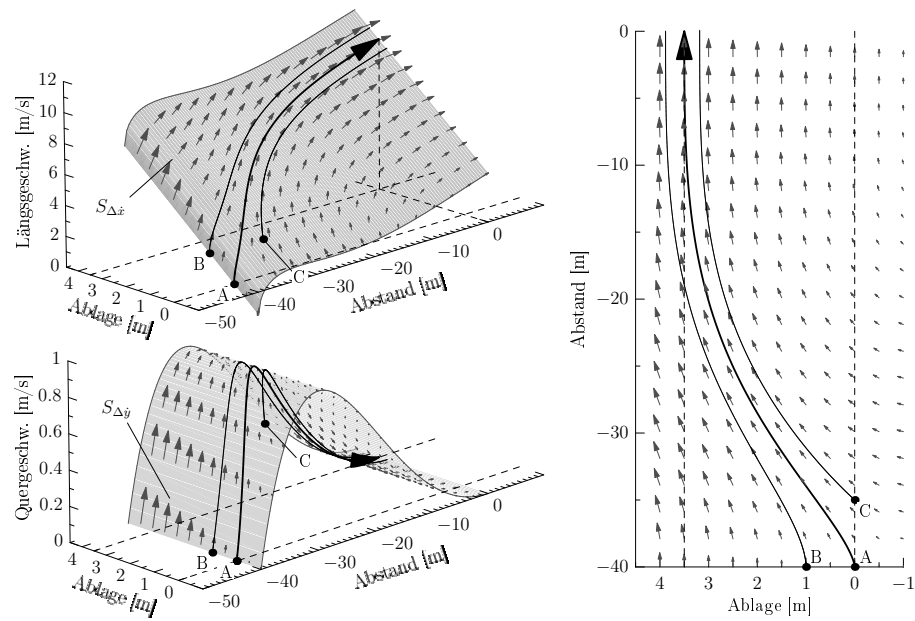


Abbildung 4.25: Richtungsfeld der *Sliding-Mode*-Regelung bei Neigung der Schaltfläche $S_{\Delta x}$ und resultierende Systemtrajektorien für unterschiedliche Anfangsbedingungen.

als bei der Bewegung auf der Soll-Trajektorie (Manöver A). Für negative Ablagefehler (Manöver C) wird hingegen eine geringere Längsgeschwindigkeit vorgegeben. Dies hat zur Folge, dass das durch die Schaltfläche $S_{\Delta\dot{y}}$ vorgegebene Quergeschwindigkeitsprofil für Manöver B schneller, im Verlauf von Manöver C langsamer als bei der Bewegung auf der Soll-Trajektorie durchlaufen wird. Da sich die Querposition des Fahrzeugs aus der Integration der Quergeschwindigkeit ergibt, wird der zurückgelegte Weg in Querrichtung verringert bzw. vergrößert. Anfängliche Ablagefehler werden durch diese Maßnahme teilweise kompensiert.⁴⁵

Wird eine anhand der Gleichungen (4.33) und (4.34) vorgegebene Soll-Trajektorie

$$\chi_{\text{ref}}(\Delta x) = [\Delta x_{\text{ref}}(\Delta x) \quad \Delta \dot{x}_{\text{ref}}(\Delta x) \quad \Delta y_{\text{ref}}(\Delta x) \quad \Delta \dot{y}_{\text{ref}}(\Delta x)]^T$$

vorausgesetzt, lassen sich die Schaltflächen der zuvor angestellten Untersuchungen mit den Schaltfunktionen

$$\begin{aligned} s_{\Delta\dot{x}}(\Delta x, \Delta \dot{x}, \Delta y, \Delta \dot{y}) &= (\Delta y_{\text{ref}}(\Delta x) - \Delta y) m_{\Delta\dot{x}} + \Delta \dot{x}_{\text{ref}}(\Delta x) - \Delta \dot{x} \\ s_{\Delta\dot{y}}(\Delta x, \Delta \dot{x}, \Delta y, \Delta \dot{y}) &= (\Delta y_{\text{ref}}(\Delta x) - \Delta y) m_{\Delta\dot{y}} + \Delta \dot{y}_{\text{ref}}(\Delta x) - \Delta \dot{y} \end{aligned}$$

beschreiben. Die resultierenden Flächen besitzen lineare Querschnitte in der Δy - $\Delta \dot{x}$ - bzw. Δy - $\Delta \dot{y}$ -Ebene mit den Steigungen $m_{\Delta\dot{x}}$ bzw. $m_{\Delta\dot{y}}$. Damit der Systemzustand auf den Schaltflächen gegen die Soll-Trajektorie strebt, muss $m_{\Delta\dot{y}} < 0$ gelten. Mit der Steigung $m_{\Delta\dot{x}}$ kann die Annäherung an die Soll-Trajektorie zusätzlich beeinflusst werden. Wird $m_{\Delta\dot{x}} > 0$ gewählt, erfolgt bei Querabweichungen von der Soll-Trajektorie eine Anpassung der Längsgeschwindigkeit. Befindet sich das Fahrzeug z. B. weiter rechts als über die Soll-Trajektorie vorgegeben, wird die Längsgeschwindigkeit reduziert. In diesem Fall steht für die Querbewegung zum Erreichen der Soll-Trajektorie mehr Zeit zur Verfügung.

4.4.3 Regelgesetz (integriert)

Die bisherigen Überlegungen führten zu einer Soll-Trajektorie im Zustandsraum, die sich durch die geeignete Wahl von Schaltflächen als Systembewegung im Gleitzustand ergibt. Wird die Bewegung des Systemzustands auf den Schaltflächen erzwungen, erfolgt eine Annäherung an die Soll-Trajektorie auch unter dem Einfluss von Störungen. In diesem Abschnitt wird ein Regelgesetz angegeben, das auf der Ebene von Beschleunigungsvorgaben den Systemzustand auf die Schaltflächen führt und auf diesen einen Gleitzustand bewirkt.

Das Regelgesetz beschreibt die Strategie bei der Umschaltung der Struktur des *Sliding-Mode*-Reglers und damit der erzeugten Soll-Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung. Ausgehend von einem Relais-Regelgesetz, wird zwischen den Stellgrößen \ddot{x}_{max}^+ und

⁴⁵Die Kompensation erfolgt allein durch Eingriffe in die Längsdynamik. Ein Überspringen in Querrichtung über die Soll-Ablage kann auf diese Weise nicht korrigiert werden.

\ddot{x}_{\max}^- in Längsrichtung bzw. \ddot{y}_{\max}^+ und \ddot{y}_{\max}^- in Querrichtung umgeschaltet. Die Umschaltung erfolgt anhand der Lage des Systemzustands bezüglich der Schaltflächen. Das in Abschnitt 4.1.2 beschriebene schnelle Umschalten der Stellgröße wird im Folgenden durch die Einführung von Grenzsichten konstanter Breiten $\Phi_{\Delta\dot{x}}$ und $\Phi_{\Delta\dot{y}}$ um die Schaltflächen vermieden. Hieraus ergibt sich eine kontinuierliche Approximation des diskontinuierlichen Regelgesetzes. Mit einer symmetrischen Auslegung der Stelleingriffe in Längs- und Querrichtung, d. h. $\ddot{x}_{\max}^+ = \ddot{x}_{\max} = -\ddot{x}_{\max}^-$ bzw. $\ddot{y}_{\max}^+ = \ddot{y}_{\max} = -\ddot{y}_{\max}^-$, lässt sich das Regelgesetz mit

$$\Delta\ddot{x}_{\text{soll}}(t) = \begin{cases} \ddot{x}_{\max} (s_{\Delta\dot{x}}(\Delta x, \Delta y)/\Phi_{\Delta\dot{x}}) & , \text{ für } |s_{\Delta\dot{x}}| \leq \Phi_{\Delta\dot{x}} \\ -\text{sgn}(s_{\Delta\dot{x}}(\Delta x, \Delta y)) \ddot{x}_{\max} & , \text{ für } |s_{\Delta\dot{x}}| > \Phi_{\Delta\dot{x}} \end{cases}$$

und

$$\Delta\ddot{y}_{\text{soll}}(t) = \begin{cases} \ddot{y}_{\max} (s_{\Delta\dot{y}}(\Delta x, \Delta y)/\Phi_{\Delta\dot{y}}) & , \text{ für } |s_{\Delta\dot{y}}| \leq \Phi_{\Delta\dot{y}} \\ -\text{sgn}(s_{\Delta\dot{y}}(\Delta x, \Delta y)) \ddot{y}_{\max} & , \text{ für } |s_{\Delta\dot{y}}| > \Phi_{\Delta\dot{y}} . \end{cases}$$

angeben.

4.4.4 Parametrierung (integriert)

In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Parametrierungen der zuvor beschriebenen *Sliding-Mode*-Regelung anhand von Simulationen untersucht. Variiert werden dabei die Schaltflächenparameter $m_{\Delta\dot{x}}$ und $m_{\Delta\dot{y}}$. Die Grenzsichtbreiten werden derart gewählt, dass der Systemzustand exakt auf den Schaltflächen geführt wird, ein „Rattern“ der Stellgröße jedoch vermieden wird.

Wie schon bei den zuvor angestellten Überlegungen wird als Szenario der Fahrstreifenwechsel hinter einem Vorderfahrzeug bei gleichzeitiger positiver Längsbeschleunigung betrachtet. Der Systemzustand zu Beginn des Manövers dient als Anfangswert bei der Initialisierung der Soll-Trajektorie. Im Verlauf des Manövers wird eine Störung aufgeschaltet, durch die das Fahrzeug sprunghaft um einen Meter in negativer Querrichtung versetzt wird. Um die Reaktion des Regelsystems für unterschiedliche Schaltflächenkonfigurationen vergleichen zu können, wird das Manöver zusätzlich ohne Störeinfluss simuliert.

In Abbildung 4.26 sind die Projektionen der Schaltflächen der jeweiligen *Sliding-Mode*-Regelung sowie die zeitlichen Verläufe der generierten Längs- und Querbewegungen für das beschriebene Manöver dargestellt. Die durchgezogene eingezeichnete Systemtrajektorie entspricht dem gestörten Fall des Manövers. Im Falle der unterbrochen dargestellten Trajektorie wird das Manöver ohne Störeinfluss durchgeführt. Zur Verdeutlichung sind in den beiden dreidimensionalen Graphen die Projektionen der Trajektorien in die Δx - Δy -Ebene abgebildet.

Kompensation durch Lenkeingriffe

Für die in Abbildung 4.26(a) veranschaulichte Auslegung der Schaltflächen wurde eine Flächenneigung ausschließlich für die Schaltfläche $S_{\Delta y}$ vorgenommen. Da $m_{\Delta \dot{x}} = 0$ gewählt wurde, erfolgt eine konstante positive Beschleunigung unabhängig von möglichen lateralen Abweichungen bezüglich der Soll-Trajektorie. Dies ist anhand des nahezu konstanten zeitlichen Verlaufs der erzeugten Längsbeschleunigung ersichtlich. Der in grau dargestellte Verlauf der Soll-Querbeschleunigung weist zunächst den mit Gleichung (4.34) geplanten sinusförmigen Verlauf auf. Auf den Störeinfluss nach ca. 3 s reagiert die Regelung mit einer entgegenwirkenden Soll-Beschleunigung. Im mittleren Graphen ist erkennbar, dass sich der Systemzustand aufgrund der Störung unterhalb von $S_{\Delta y}$ befindet. Bis zum Erreichen der Schaltfläche ist demnach die Struktur des Reglers aktiv, für die die vorgegebene Maximalbeschleunigung in positiver Δy -Richtung ausgegeben wird. Der anschließende Verlauf der Stellgröße entspricht qualitativ dem ungestörten Fall. Durch die Überhöhung der Schaltfläche gegenüber der Soll-Trajektorie wird das Manöver jedoch mit größeren Quergeschwindigkeiten durchgeführt. Dies bewirkt eine weitere Annäherung an die Soll-Trajektorie, die anhand der Projektionen der Systemtrajektorien in die Δx - Δy -Ebene ersichtlich ist.

Kompensation durch Lenkeingriffe und Verzögerung

In Abbildung 4.26(b) ist eine Schaltflächenkonfiguration dargestellt, bei der sowohl $S_{\Delta y}$ als auch $S_{\Delta \dot{x}}$ geneigt sind. Während der Verlauf der Stellgrößen im ungestörten Fall identisch mit der zuvor betrachteten Parametrierung ist, bewirken Abweichungen des Systemzustands von der Soll-Trajektorie neben einer Reaktion in Querrichtung ebenfalls eine Beeinflussung der Beschleunigungsvorgabe in Längsrichtung. Für die vorliegende Störung befindet sich der Systemzustand nach dem Störeingriff oberhalb der Schaltfläche $S_{\Delta \dot{x}}$, so dass sich aus der Reglerstruktur ein negativer Längseingriff ergibt. Bezüglich $S_{\Delta y}$ befindet sich der Systemzustand wie zuvor unterhalb der Fläche, wodurch eine negative Soll-Querbeschleunigung erzeugt wird. Anhand der zeitlichen Stellgrößenverläufe ist erkennbar, dass sich als Reaktion auf den Störeingriff eine gleichzeitige Verzögerungsanforderung und eine der Störung entgegengerichtete Querbeschleunigungsanforderung ergibt. Die Projektion der Systemtrajektorien in die Δx - Δy -Ebene zeigt gegenüber der zuvor betrachteten Auslegung der Schaltflächen eine verbesserte Kompensation der Störung. Für den Fahrer ergibt sich eine ganzheitliche Fahrzeugreaktion auf Störungen, die sowohl die Längs- als auch die Querbewegung des Fahrzeugs umfasst. Dies gilt insbesondere für nicht sprunghafte Störungen, wie sie in realen Verkehrsszenarien auftreten.

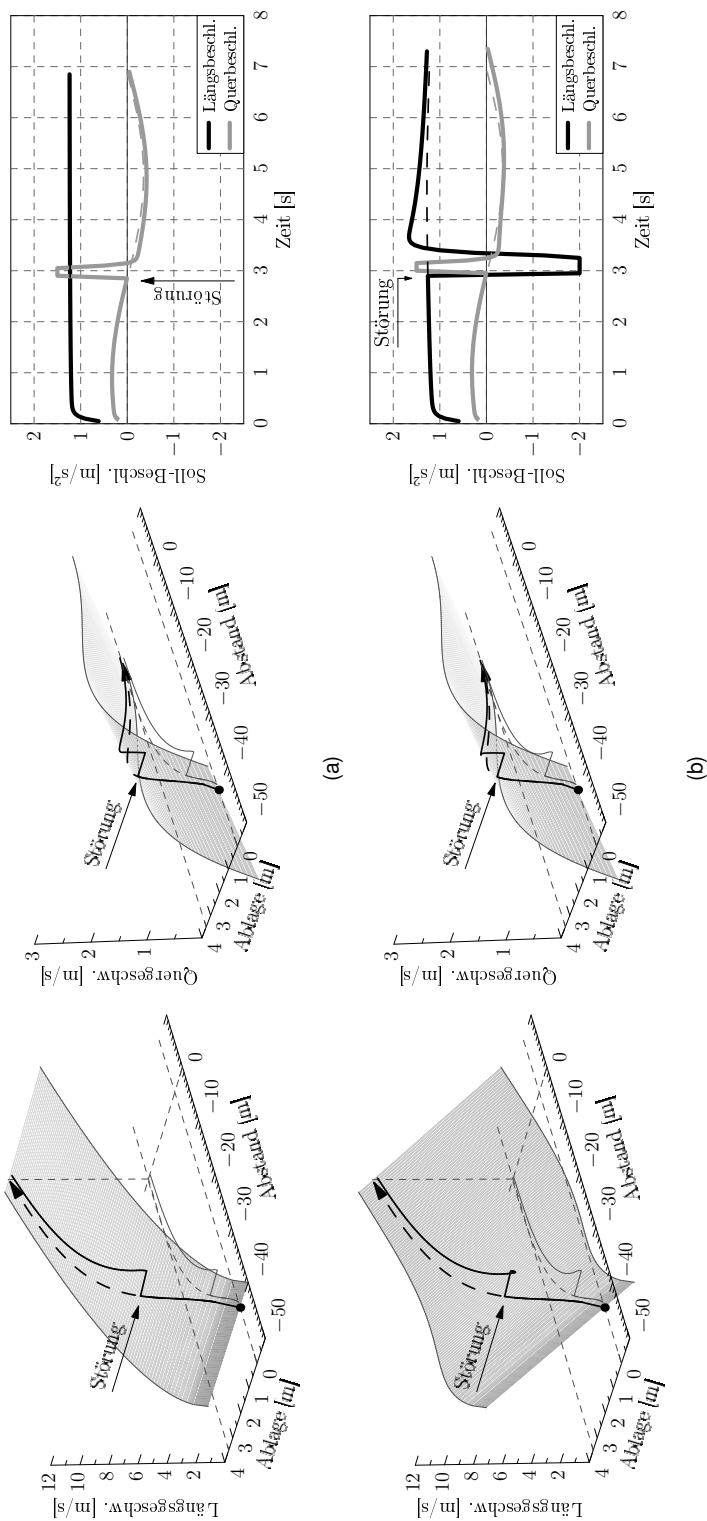


Abbildung 4.26: Parametrierungen und Stellgrößenverlauf der integrierten *Sliding-Mode*-Regelung zur Längs- und Querführung für unterschiedliches Systemverhalten bei Störungen während eines Überholmanövers: Störungskompensation durch (a) Eingriffe in die Querbewegung, (b) Eingriffe in die Längs- und Querbewegung.

4.5 Unterlagerte Beschleunigungsregelungen

Wie zu Beginn des Kapitels dargestellt, sind die bisher entworfenen Regler zur Längs- und Querverführung auf einer übergeordneten Ebene angesiedelt und erzeugen Beschleunigungsvorgaben in Längs- bzw. Querrichtung. Diese Soll-Beschleunigungen werden durch zwei unterlagerte Regelungen in eine Fahrzeugbewegung umgesetzt. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf den zuvor behandelten übergeordneten Regelungen liegt, wird im Folgenden lediglich ein schematischer Überblick über die Funktionsweise der Beschleunigungsregler gegeben.

Regelung der Längsbeschleunigung

Die Regelung der Längsbeschleunigung wird entsprechend Abschnitt 3.2.1 von einem auf dem Motorsteuergerät implementierten Beschleunigungsregler und einem Triebstrangkoordinator übernommen, die in ihrer Struktur und Parametrierung vorgegeben sind. Die unterlagerte Regelung besteht aus zwei Komponenten, einem dynamischen Regelanteil und einem Vorsteuerungsanteil. Als Regler wird ein linearer Proportional-Integral-Regler eingesetzt. Durch die Integration des Regelfehlers wird eine bleibende Regelabweichung verhindert. Aufgrund der Nichtlinearität der Fahrzeuglängsdynamik ist dieser lineare PI-Regler jedoch nicht für den gesamten Geschwindigkeitsbereich geeignet. In einem Vorsteuerungsanteil werden deshalb geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstände wie z. B. der Luft- oder Rollwiderstand bestimmt. Außerdem werden nicht direkt messbare Größen wie die Fahrbahnsteigung oder der Beladungszustand geschätzt. Die Wirkung dieser Störgrößen wird in einer *feedforward*-Steuerung kompensiert, so dass sich eine linearisierte Regelstrecke ergibt. Als Stellgrößen werden Anforderungen an den Antriebstrang bzw. an das Bremssystem generiert.

Regelung der Querbewegung

Analog zur Längsbeschleunigungsregelung umfasst die Regelung der Querbewegung einen dynamischen PI-Regler sowie eine Vorsteuerung zur Kompensation von Störeinflüssen und dem Einfluss der momentanen Längsgeschwindigkeit. Neben der Wirkung der Straßenneigung auf die Querbewegung des Fahrzeugs ist insbesondere hervorzuheben, dass die Fahrbahnkrümmung auf Ebene der Querbewegungsregelung kompensiert wird (vgl. Abschnitt 4.3.1). Anhand der über das Kamerasystem gemessenen Krümmung κ wird die Zentripetalbeschleunigung

$$\ddot{y}_\kappa = \dot{x}^2 \kappa$$

berechnet, die beim Durchfahren der Kurve mit der Geschwindigkeit \dot{x} auftritt. Diese Beschleunigung wird als Vorsteuerung aufgeschaltet, wodurch bei idealer Kompensation aus

4.5 Unterlagerte Beschleunigungsregelungen

Sicht der übergeordneten Regelung ein linearer Fahrbahnverlauf resultiert. Aus der Überlagerung des Regelanteils und des Vorsteuerungsanteils ergibt sich als Stellgröße ein Lenkmoment, das von der elektromechanischen Lenkung umgesetzt wird.

Kapitel 5

Implementierung und Fahrversuche

Es ist nicht genug, zu wissen,
man muß auch anwenden; es ist
nicht genug zu wollen, man muß
auch tun.

*(Johann Wolfgang von Goethe,
1749-1832)*

In Kapitel 4 wurden Regelungen für die Teilaufgaben der Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerführung sowie für eine integrierte Längs- und Querführung entworfen. Die Untersuchung unterschiedlicher Parametrierungen erfolgte anhand von Simulationen. Im folgenden Kapitel wird die Implementierung dieser Regelsysteme im Rahmen eines Fahrerassistenzsystems zur automatisierten Fahrzeugführung geschildert. Um das in den Simulationen beobachtete Regerverhalten zu validieren, werden reale Versuchsfahrten durchgeführt und in Form von Messschrieben präsentiert.

Abschnitt 5.1 erläutert die Umsetzung des Fahrerassistenzsystems in einem Versuchsfahrzeug. Es wird ein Überblick über die Systemarchitektur und die benutzten Komponenten der Aktorik und Sensorik gegeben. Weiterhin wird das Bedienkonzept zur Interaktion des Fahrers mit dem Assistenzsystem dargestellt.

Die Ergebnisse automatisiert längsgeführter Versuchsfahrten werden in Abschnitt 5.2 vorgestellt. Anhand von Annäherungsmanövern an ein Vorderfahrzeug wird eine beispielhafte Parametrierung der Längsregelung untersucht.

Abschnitt 5.3 befasst sich mit Fahrversuchen zur automatisierten Querführung. Anhand von Autobahnfahrten wird das Querregelungsverhalten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Fahrbahnkrümmungen dargestellt.

Abschließend erfolgt in Abschnitt 5.4 die Beschreibung von Versuchsfahrten zur integrierten Längs- und Querführung. Als Beispielszenario wird ein automatisiert durchgeführtes Überholmanöver betrachtet.

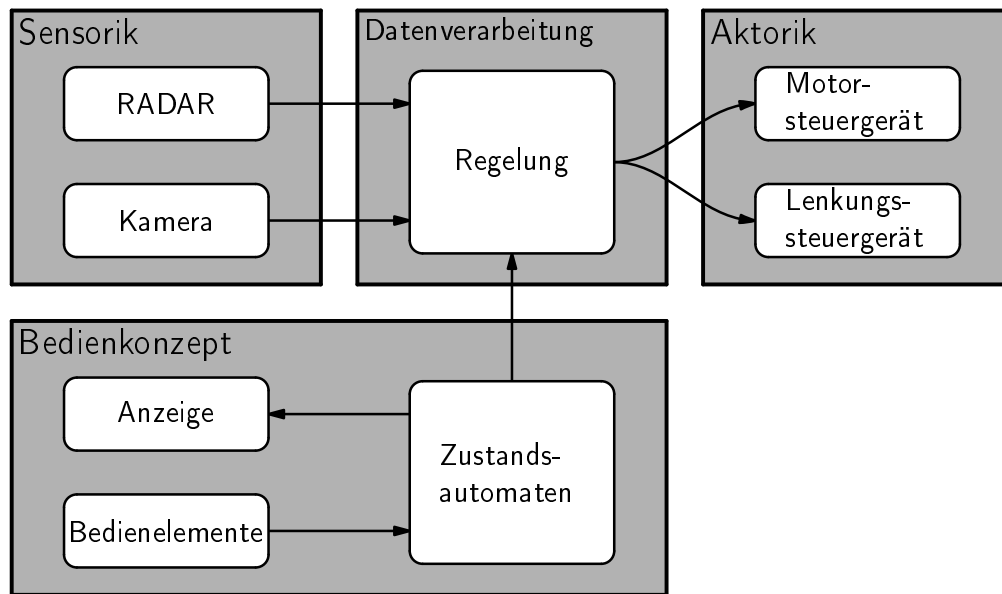


Abbildung 5.1: Architektur des Fahrerassistenzsystems zur automatisierten Fahrzeugführung.

5.1 Systemarchitektur

Zur Erprobung der in dieser Arbeit entworfenen Regelungen wurde ein Versuchsträger von der Volkswagen AG zur Verfügung gestellt. Bei der Implementierung des Fahrerassistenzsystems wurde die für Serienfahrzeuge verfügbare Aktorik und Sensorik verwendet. Abbildung 5.1 zeigt die Komponenten des Assistenzsystems und deren Vernetzung. Über die eingebaute Sensorik erhält das System Umweltinformationen, die von einem Fahrzeugrechner verarbeitet werden. Dabei kommen die in Kapitel 4 beschriebenen Regelungen zum Einsatz. Die erzeugten Stellsignale werden an die Fahrzeugaktorik gesendet. Zur Interaktion des Fahrers mit dem Assistenzsystem wurde ein Bedienkonzept implementiert, das dem Fahrer einerseits die Aktivierung bzw. Deaktivierung des Systems und die Vorgabe von Soll-Größen ermöglicht, andererseits den aktuellen Systemzustand anzeigt. Die dargestellten Komponenten werden im Folgenden detailliert beschrieben.

Sensorik Das Versuchsfahrzeug verfügt serienmäßig über eine Vielzahl von Sensoren, die den eigenen Fahrzeugzustand erfassen. Für das in dieser Arbeit beschriebene Fahrerassistenzsystem ist die Messung der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, der Beschleunigung in Längs- und Querrichtung sowie des momentanen Lenkradwinkels von Bedeutung.

Neben den serienmäßigen Sensoren wurde der Versuchsträger mit einer Sensorik ausgerüstet, die Informationen über das Fahrzeugumfeld erfasst. Als objektgebender Sensor

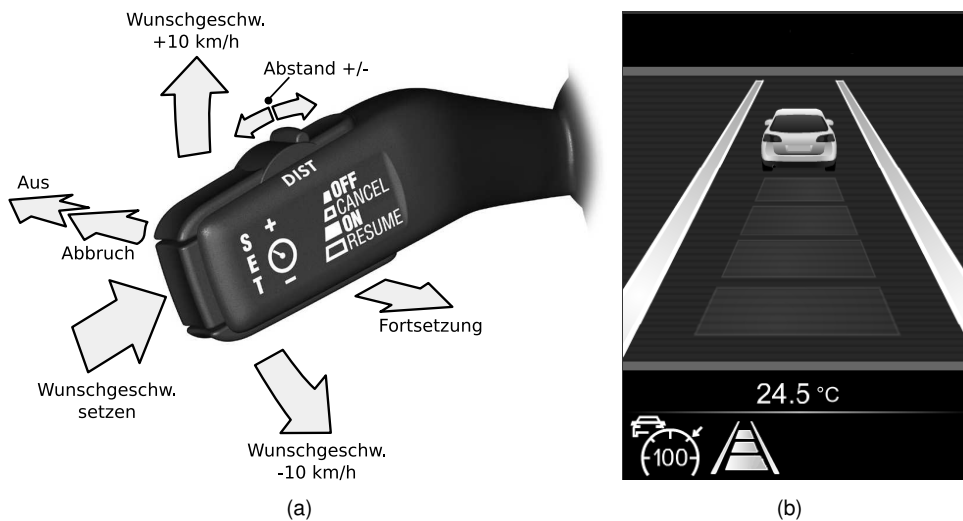


Abbildung 5.2: (a) Bedienelement zur Interaktion des Fahrers mit dem Fahrerassistenzsystem. (b) Anzeige des aktuellen Zustands des Assistenzsystems im Kombiinstrument.

kommt ein 76-77 GHz RADAR zum Einsatz.⁴⁶ Dieser Sensor besitzt einen Öffnungswinkel von 12° und kann unter optimalen Bedingungen maximal acht Objekte gleichzeitig in einem Abstand bis zu 200 m detektieren. Das Messprinzip ermöglicht eine direkte Messung des Abstands und der Relativgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Zur Erfassung der Position und Ausrichtung des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens sowie zur Erkennung des Fahrbahnverlaufs wird ein monochromes, monokulares Kamerasystem verwendet.⁴⁷ Der Sensor liefert Informationen über die Breite des Fahrstreifens und die Krümmung des vorausliegenden Streckenabschnitts. Weiterhin wird die Querablage des Fahrzeugs bezüglich der Fahrstreifenmitte sowie der Gierwinkel innerhalb des Fahrstreifens detektiert. Eindeutige und beidseitig aufgebrachte Fahrstreifenmarkierungen sind Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit des Sensors.

Bedienkonzept Zur Bedienung des Assistenzsystems wurde der Lenkstockhebel eines serienmäßigen ACC-Systems benutzt. Durch die in Abbildung 5.2(a) dargestellten Interaktionen kann der Fahrer das System aktivieren, deaktivieren, eine Wunschgeschwindigkeit setzen, diese erhöhen bzw. verringern oder den gewünschten Abstand zu Vorderfahrzeugen einstellen. Neben dem ACC-Bedienelement wurde das Fahrzeug zusätzlich mit einem Schalter zur Freigabe von Lenkeingriffen ausgestattet. Die Auswertung der Fahrereingaben erfolgt mittels Zustandsautomaten. Abhängig von den aktiven Zuständen erfolgt die

⁴⁶Sensor des ACC-Systems im Passat B6

⁴⁷Kamera des Spurhalteassistenten „Lane Assist“ eines Passat CC

Freigabe von Eingriffen des Assistenzsystems in die Fahrzeugbewegung und die Ansteuerung einer Anzeige, so dass der Fahrer den Aktivierungszustand des Assistenzsystems kontinuierlich erfassen kann. Beispielhaft ist in Abbildung 5.2(b) die Anzeige während einer Fahrsituation mit aktiver Längs- und Querführung abgebildet. Im unteren Bereich der Anzeige wird dies durch zwei Piktogramme veranschaulicht. Zusätzliche Informationen wie beispielsweise die Detektion eines für die Längsregelung relevanten Vorderfahrzeugs oder der Status der Fahrstreifenerkennung werden im oberen Bereich der Anzeige dargestellt.

Abbildung 5.3(a) zeigt das Zustandsdiagramm⁴⁸ für die Aktivierung der Längsführungsfunktion. Die Fahrereingaben erfolgen über den ACC-Bedienhebel sowie über das Gas- bzw. Bremspedal. Ausgehend vom Zustand „Längsführung deaktiviert“ kann der Fahrer durch Heranziehen des Bedienhebels das System einschalten. Dies bewirkt einen Wechsel in den Zustand „Längsführung aktiviert“, in dem jedoch noch kein Eingriff in die Längsdynamik erfolgt. Durch Setzen der momentanen Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit (stirnseitiges Drücken des Hebels) erfolgt ein Wechsel in den Zustand „Längsführung aktiv“ und das Assistenzsystem übernimmt die Fahrzeuglängsführung. In diesem Zustand werden von der Regelung angeforderte Längsbeschleunigungen an die Fahrzeugaktuatorik weitergeleitet und in eine Fahrzeugbeschleunigung umgesetzt. Fordert der Fahrer über das Gaspedal eine höhere Beschleunigung als die Regelung an, erfolgt ein Wechsel in den Zustand „Längsführung passiv“. Fällt die Anforderung des Fahrers unter die des Assistenzsystems, wird wieder in den Zustand „Längsführung aktiv“ gewechselt. Betätigt der Fahrer bei aktiver Längsführung das Bremspedal, erfolgt ein Wechsel in den Zustand „Längsführung aktiviert“. Anders als bei der zuvor betrachteten Betätigung des Gaspedals erfolgt nach Beendigung des fahrerseitigen Eingriffs kein automatischer Wechsel in den Zustand „Längsführung aktiv“. Neben dem Betätigen des Bremspedals kann der Fahrer die Längsführung über den Bedienhebel unterbrechen. Die Regeltätigkeit wird wieder aufgenommen, wenn der Fahrer eine neue Wunschgeschwindigkeit setzt oder durch Heranziehen des Bedienhebels die zuletzt gewählte Geschwindigkeit als Soll-Geschwindigkeit vorgibt.

Die Aktivierung der Querführung erfolgt nach dem in Abbildung 5.3(b) dargestellten Zustandsdiagramm. Zu Beginn befindet sich das System im Zustand „Querführung deaktiviert“. Ist der Lenkeingriff über den zusätzlichen Schalter freigegeben und liegen Daten über den Fahrstreifenverlauf vor, wird die Querführung aktiviert. Um plötzliche Lenkeingriffe zu vermeiden, wird zunächst in den Zustand „Querführung einblenden“ gewechselt, in dem das zugelassene maximale Lenkmoment komfortabel auf den Maximalwert erhöht wird. Ist der Maximalwert erreicht, erfolgt ein Wechsel in den Zustand „Querführung aktiv“. Die Querführung wird unterbrochen, wenn der Fahrer den Schalter betätigt oder das Kamerasystem keine gültige Fahrstreifeninformationen liefert. In diesem Fall erfolgt ein Wechsel in den Zustand „Querführung ausblenden“, der ausgehend von der letzten Momentenanforderung das Lenkmoment auf 0 Nm reduziert. Anschließend wird in den Zustand „Querführung deaktiviert“ gewechselt. Durch dieses Vorgehen wird ein ruckhaftes Deaktivieren des

⁴⁸Die Darstellung der Zustandsautomaten folgt der Notation der *Unified Modeling Language* (UML) (Oesterich 2004).

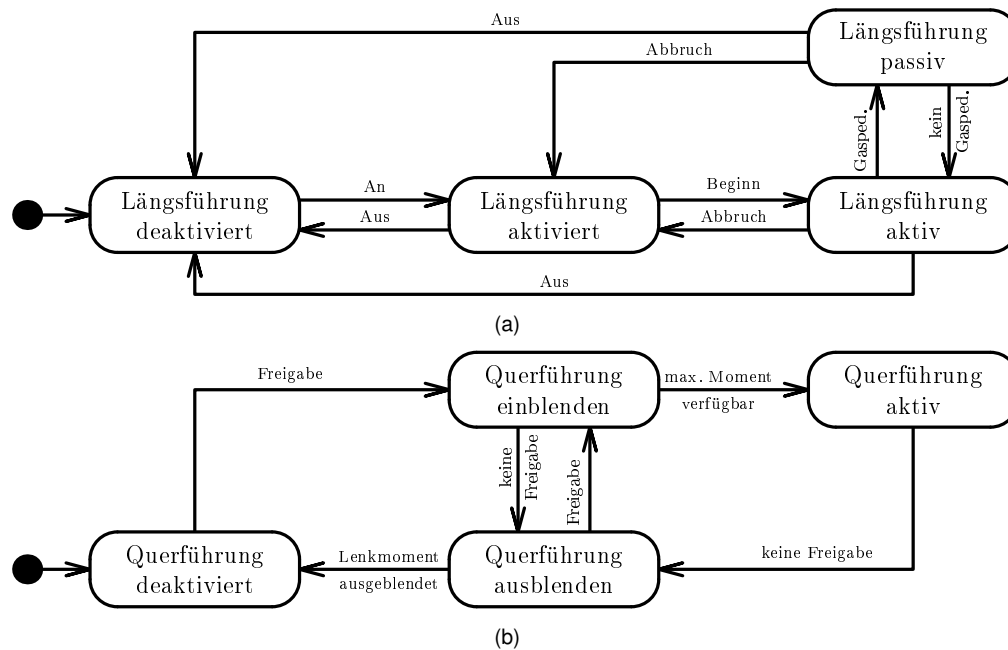


Abbildung 5.3: Zustandsdiagramme für die Aktivierung der (a) Längsführungsfunktion und (b) Querführungsfunktion.

Lenkeingriffs vermieden. Zu weiteren Zustandswechseln während des Ein- bzw. Ausblendens der Querführung kann es kommen, wenn der Fahrer den Freigabeschalter bedient oder sich die Verfügbarkeit von Informationen aus der Fahrstreifenerkennung ändert.

Datenverarbeitung Zur Datenverarbeitung wurde das Versuchsfahrzeug mit einem Fahrzeugrechner ausgerüstet. Die Kommunikation mit den Sensoren und Aktoren bzw. den Komponenten der Bedienschnittstelle erfolgt über ein *Controller Area Network* (CAN) Bus-system. Die über die Sensoren aufgenommenen Umfeldinformationen werden entsprechend der implementierten Assistenzfunktion verarbeitet und führen zu Stellsignalen, die an die Fahrzeugaktorik weitergeleitet werden. Die zur Erzeugung der Stellsignale angewandten Regelungsstrategien sind in Kapitel 4 ausführlich dargestellt. Es stehen Programme zur parallelen bzw. integrierten Längs- und Querregelung der Fahrzeugdynamik zur Verfügung. Bei der Erzeugung der Stellsignale wird der aktuelle Systemzustand berücksichtigt, der sich aus den zuvor beschriebenen Zustandsautomaten ergibt. Längs- bzw. Quereingriffe erfolgen nur dann, wenn die Führungsfunktion in der entsprechenden Bewegungsrichtung freigegeben ist.

Aktorik Zur Beeinflussung der Fahrzeuglängsbewegung werden die Komponenten des Antriebsstrangs – im Wesentlichen der Verbrennungsmotor und das Getriebe – sowie die

Aktoren des vorhandenen ESP-Systems elektronisch angesteuert. Hierzu stellt das Motorsteuergerät eine Beschleunigungsschnittstelle zur Verfügung, die eine unterlagerte Beschleunigungsregelung umfasst. Als Eingangsgröße dieser Schnittstelle dient eine Soll-Längsbeschleunigung. Unter Berücksichtigung der momentanen Randbedingungen wie z. B. Beladungszustand, Fahrbahnsteigung oder Windeinfluss werden geeignete Stellsignale für den Verbrennungsmotor, das Getriebe bzw. das ESP-System generiert. Dabei findet eine Koordination der Aktoreingriffe statt, so dass eine gegenseitige Behinderung der Eingriffe vermieden wird. Über die Schnittstelle wird eine Beeinflussung der Fahrzeuglängsbewegung über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bis hin zum Stillstand ermöglicht.

Neben Aktoren, die in die Längsbewegung eingreifen, verfügt der Versuchsträger über eine serienmäßige elektromechanische Servolenkung (*Electric Power Steering*, EPS) zur Beeinflussung der Fahrzeugquerbewegung (vgl. Abschnitt 3.3.1). Über einen an der Lenkstange angreifenden stromgeregelten Asynchronmotor kann ein zusätzliches Lenkmoment aufgebracht werden. Die Ansteuerung des Elektromotors erfolgt durch ein Lenkungssteuergerät, das über eine Momentenschnittstelle mit einer unterlagerten Regelung verfügt.

5.2 Fahrversuche zur Längsführung

Im folgenden Abschnitt werden Messungen aus realen Fahrversuchen zur automatisierten Längsführung präsentiert. Die Längsführung wird dabei vollständig von dem zuvor beschriebenen Assistenzsystem übernommen. Die in Abschnitt 4.2 beschriebene Längsregelung wurde anhand von Versuchsfahrten derart ausgelegt, dass sich ein komfortables Annäherungs- und Folgeverhalten mit angemessenen Beschleunigungsanforderungen ergibt. Als Referenz für diese subjektive Bewertung des Reglerverhaltens dienten ACC-Systeme verschiedener Serienfahrzeuge.

Das den Fahrversuchen zugrunde liegende Szenario umfasst die Annäherung an ein Vorderfahrzeug, das sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 22m/s bewegt. Es werden drei Manöver mit unterschiedlichen Ausgangssituationen betrachtet. Abbildung 5.4 zeigt die Trajektorien der Fahrzeugbewegung in der Phasenebene sowie die zeitlichen Verläufe des Abstands und der Stellgröße für die unterschiedlichen Manöver. Die aus der Parametrierung resultierende Schaltkurve und der Verlauf der Grenzschichten ist in der Phasenraumdarstellung grau eingezeichnet. Weiterhin ist ein Bereich kritischer Verkehrssituationen schraffiert dargestellt. Befindet sich der Systemzustand in diesem Bereich, wird der Fahrer akustisch und optisch aufgefordert, die Längsführung zu übernehmen. Der Bereich ergibt sich aus der zugelassenen Maximalverzögerung des Assistenzsystems von -3m/s^2 und einem minimalen Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug. Im Folgenden wird das Verhalten des Assistenzsystems in den Beispielmanövern näher betrachtet.

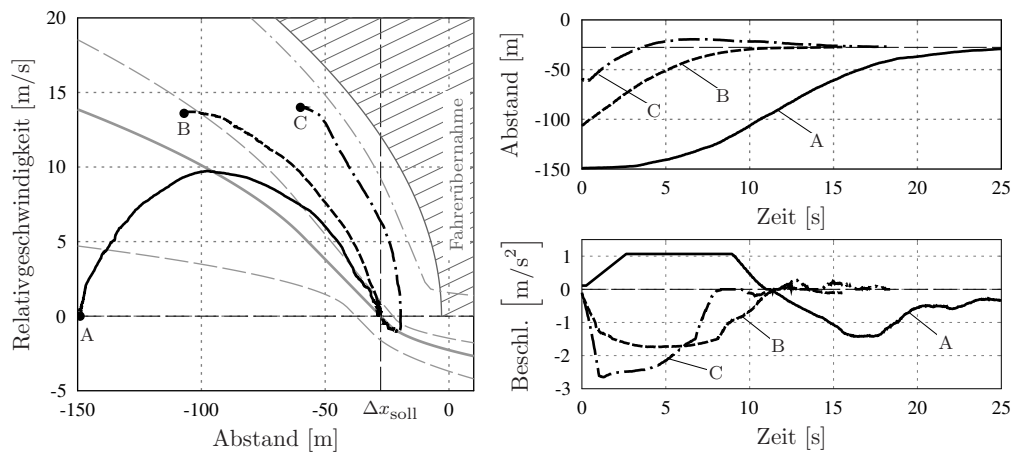


Abbildung 5.4: Trajektorien im Zustandsraum (links), zeitlicher Verlauf des Abstands (rechts-oben) und zeitlicher Verlauf der Soll-Längsbeschleunigung (rechts-unten) für Annäherungsmanöver mit unterschiedlichen Anfangszuständen.

Manöver A Manöver A beginnt bei einem Abstand von 150 m zum Vorderfahrzeug. Beide Fahrzeuge besitzen zu Beginn eine Geschwindigkeit von ca. 22 m/s, d. h. die Relativgeschwindigkeit beträgt 0 m/s. Um das Manöver einzuleiten, erhöht der Fahrer die Wunschgeschwindigkeit durch Betätigung des ACC-Bedienhebels. Wie aus der Phasenraumdarstellung ersichtlich, befindet sich der Systemzustand zunächst unterhalb der unteren Grenzschicht. Es wird die maximale positive Beschleunigung als Stellgröße generiert. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, wird das Stellsignal des Abstandsreglers über einen Minimum-Operator mit dem Stellsignal des in Abschnitt 4.1.1 dargestellten Geschwindigkeitsreglers verknüpft. Aus dieser Verknüpfung resultiert der im Stellgrößenverlauf gradientenbegrenzte Anstieg auf eine positive Soll-Beschleunigung von 1 m/s². Die positive Soll-Beschleunigung wird bei weiterer Annäherung an die Schaltkurve reduziert. Nach ungefähr 11 s befindet sich der Systemzustand oberhalb der Schaltkurve, so dass negative Soll-Beschleunigungen angefordert werden. Durch moderate Verzögerungen kleiner -1,5 m/s² wird der Systemzustand in den Wunschzustand geführt und erreicht diesen nach ca. 25 s. Der zeitliche Verlauf des Annäherungsmanövers ist in Abbildung 5.4 (rechts-oben) veranschaulicht.

Manöver B Zu Beginn von Manöver B nähert sich das geregelte Fahrzeug aus ungefähr 110 m Entfernung mit einer Relativgeschwindigkeit von ca. 14 m/s dem Vorderfahrzeug an. Im Vergleich zu Manöver A werden von Beginn an negative Soll-Beschleunigungen erzeugt. In der Phasenraumdarstellung ist ersichtlich, dass die Systemtrajektorie in der Umgebung der inneren Grenzschicht verläuft. Durch die Konstruktion der Schaltkurve und der Grenzschichten nach Abschnitt 4.2 wird ein Verhalten begünstigt, das zu Beginn eine annähernd konstante Verzögerung bewirkt, die im weiteren Verlauf der Annäherung asym-

ptotisch abklingt. Dieses charakteristische Verhalten lässt sich anhand des dargestellten Stellgrößenverlaufs erkennen.

Manöver C In Manöver C erfolgt eine kritische Annäherung an das Vorderfahrzeug. Wie schon bei dem zuvor betrachteten Manöver nähert sich das geregelte Fahrzeug mit einer Relativgeschwindigkeit von ungefähr 14 m/s an, wobei der Abstand zu Beginn mit ca. 60 m deutlich geringer ist. Das Systemverhalten in dieser Situation wird im Wesentlichen durch den Verlauf der äußeren Grenzschicht bestimmt, an der die maximale Verzögerung als Stellgröße ausgegeben wird. Bei der Parametrierung wurde davon ausgegangen, dass der Fahrer ein angemessenes Unterschreiten des Wunschabstands als komfortabler empfindet als eine starke Verzögerung, die zur Einhaltung des Wunschabstands notwendig wäre.⁴⁹ Dieses gewünschte Überschwingen ist sowohl in der Phasenraumdarstellung als auch im zeitlichen Verlauf des Abstands erkennbar. Während des Manövers wird eine maximale Verzögerung von ungefähr $-2,5 \text{ m/s}^2$ angefordert. Nachdem die Überschussgeschwindigkeit abgebaut wurde, folgt eine Phase des Zurückfallens, die durch die Konstruktion der Schaltfunktion rechts des Soll-Abstands vorgegeben ist. Durch geringe Stelleingriffe wird der Wunschabstand wieder hergestellt und die Geschwindigkeit an das Vorderfahrzeug angeglichen.

Anhand der Beispielmanöver konnte gezeigt werden, dass die in Abschnitt 4.2 vorgestellte Abstandsregelung mit einer statischen Parametrierung sowohl für kritische als auch für alltägliche Annäherungen an ein Vorderfahrzeug geeignet ist. Die Kriterien einer optimalen Reglerauslegung im Rahmen einer Längsführungsassistenz werden in dieser Arbeit nicht untersucht.

5.3 Fahrversuche zur Querführung

Zur Veranschaulichung der Querführungsfunktion werden in diesem Abschnitt Fahrversuche vorgestellt, bei denen die Fahrzeugquerregelung durch den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Regelungsansatz erfolgt. Es wurde eine Reglerparametrierung gewählt, die zu einer exakten Mittenführung innerhalb des befahrenen Fahrstreifens führt. Um das Reglerverhalten zu beurteilen, werden unterschiedliche Szenarien betrachtet.

Geradeausfahrt mit Störungen Zunächst wird ein Szenario betrachtet, in dem das Reglerverhalten bei Geradeausfahrt unter dem Einfluss von Störungen gezeigt wird. Hierzu wird auf einer Teststrecke ein gerader Fahrbahnabschnitt mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 33 m/s befahren. Das Ziel der Regelung ist die Fahrzeugführung entlang der Fahrstreifenmitte. Störungen erfolgen in Form von Lenkeingriffen durch den Fahrer. Ein Überblick über den Verlauf des Manövers ist in Abbildung 5.5 gegeben. Neben der

⁴⁹Für dieses Manöver würde eine konstante Verzögerung mit ca. $-3,2 \text{ m/s}^2$ den Systemzustand in den Soll-Zustand überführen.

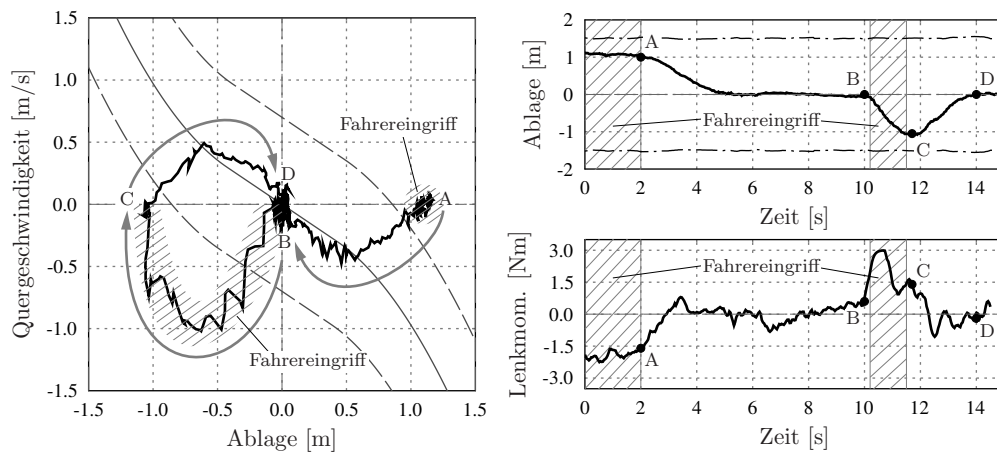


Abbildung 5.5: Untersuchung der Querführungsfunktion bei Geradeausfahrt mit Störeingriffen durch den Fahrer: Trajektorie des Systemzustands im Phasenraum (links), zeitliche Verläufe der Querablage (rechts-oben) und des Soll-Lenkmoments (rechts-unten).

Bewegung des Systemzustands im Phasenraum sind der zeitliche Verlauf der Ablage hinsichtlich der Fahrstreifenmitte und der Verlauf des Soll-Lenkmoments dargestellt. Um die Korrelation zwischen den Zeitdarstellungen und der Phasenraumdarstellung zu vereinfachen, sind spezielle Punkte A bis D in den jeweiligen Darstellungen markiert. Außerdem sind Abschnitte, in denen der Fahrer das System durch Störeingriffe übersteuert, schraffiert eingezeichnet. Das Querführungssystem wird bei einer anfänglichen Ablage von der Fahrstreifenmitte von ungefähr 1 m aktiviert (A). Als Reaktion auf diese Anfangsabweichung wird durch das Assistenzsystem ein Lenkmoment von ca. -2 Nm angefordert. Wie in der Phasenraumdarstellung zu erkennen ist, baut sich dadurch eine negative Quergeschwindigkeit auf und das Fahrzeug nähert sich der Fahrstreifenmitte an. Nach ungefähr 3 s überschreitet der Systemzustand die Schaltkurve und es werden positive Lenkmomente angefordert, wodurch sich die Quergeschwindigkeit abbaut. Eine stationäre Spurmittenführung wird ca. 5 s nach Aktivierung der Querführung erreicht. Es folgt ein Abschnitt ungestörter Fahrt. Die mit dem Kamerasystem detektierte maximale Abweichung beträgt hierbei 6,5 cm. Nach 10 s greift der Fahrer über das Lenkrad in die Fahrzeugquerbewegung ein (B). Mit einer maximalen Quergeschwindigkeit von ungefähr -1 m/s entsteht innerhalb von ca. 1,5 s eine Querabweichung von -1 m (C). Das durch die Querregelung angeforderte Lenkmoment wirkt zunächst mit dem zugelassenen Maximal eingriff von 3 Nm der Störung entgegen. Nach Beendigung des Fahrereingriffs kompensiert das Assistenzsystem den Querversatz analog zu der zuvor betrachteten Auslenkung innerhalb von ca. 2,5 s (D).

Kurvenfahrt Dieses Szenario zeigt das Reglerverhalten während einer Autobahnfahrt, in deren Verlauf Kurven mit dem für Bundesautobahnen minimal zulässigen Radius von

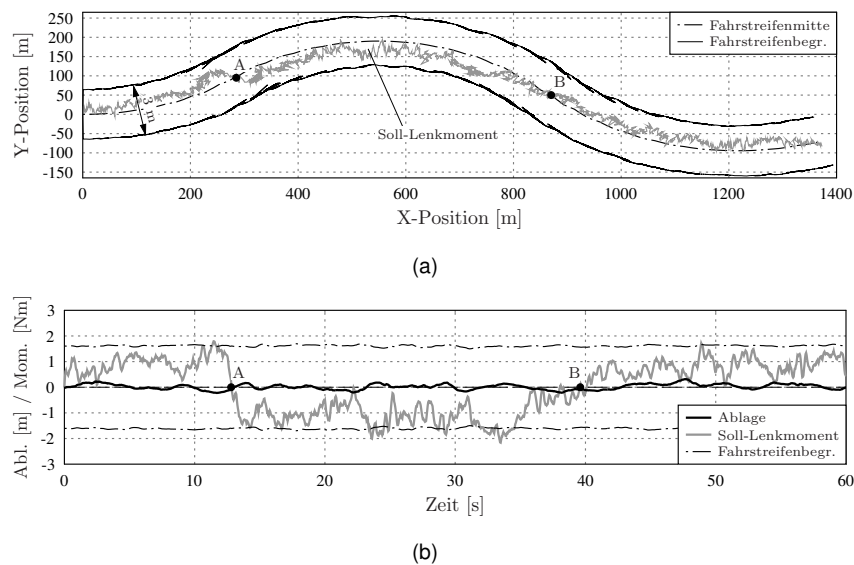


Abbildung 5.6: Untersuchung der Querführungsfunktion bei kurvenreicher Fahrbahn: (a) Überblick über den Streckenverlauf mit um den Faktor 20 skaliert eingezeichneter Fahrstreifenbreite und Soll-Lenkmoment, (b) zeitlicher Verlauf des Soll-Lenkmoments und der Querabweichung innerhalb des Fahrstreifens.

500 m durchfahren werden.⁵⁰ Aufgrund einer Geschwindigkeitsbegrenzung für diesen Streckenabschnitt wird das Manöver mit einer konstanten Längsgeschwindigkeit von ca. 28 m/s durchgeführt. Abbildung 5.6(a) zeigt den Streckenverlauf, der aus den während der Versuchsfahrt aufgenommenen Kameradaten rekonstruiert wurde. Nach einer Linkskurve zu Beginn des Manövers folgt ein Übergang in eine Rechtskurve, die schließlich erneut in eine Linkskurve übergeht. Entsprechend den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (Rohloff 2008) erfolgt der Übergang zwischen den Kurvenabschnitten in Form von Klothoiden⁵¹.

Für Autobahnfahrten stellt dieses Szenario hinsichtlich der auftretenden Fahrbahnkrümmungen ein *worst-case*-Szenario dar. Neben dem Verlauf der Fahrstreifenmitte sind in Abbildung 5.6(a) ebenfalls die Fahrstreifenbegrenzungen sowie das von der Querführung angeforderte Lenkmoment eingezeichnet. Zur Veranschaulichung erfolgte dabei eine Skalierung um den Faktor 20 orthogonal zum Fahrstreifenverlauf. In Abbildung 5.7(b) sind diese Größen, ergänzt um die Querabweichung von der Fahrstreifenmitte, im Verlauf der Zeit dargestellt. Um die Zuordnung der zeitlichen Darstellung in Abbildung 5.6(b) zur örtlichen Darstellung in Abbildung 5.6(a) zu vereinfachen, sind die Wendepunkte des Krümmungsverlaufs mit den Punkten A und B markiert. Wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, ergibt sich

⁵⁰A39 zwischen der Anschlussstelle Weyhausen und der Anschlussstelle Sandkamp

⁵¹Klothoiden werden bei der Linienführung von Autobahnen als Trassierungselement für den Übergang von Geraden zu Kreisbögen oder zwischen Kreisbögen unterschiedlicher Radien eingesetzt. Die Krümmung der durch eine Klothoide beschriebenen Kurve verhält sich proportional zum zurückgelegten Weg.

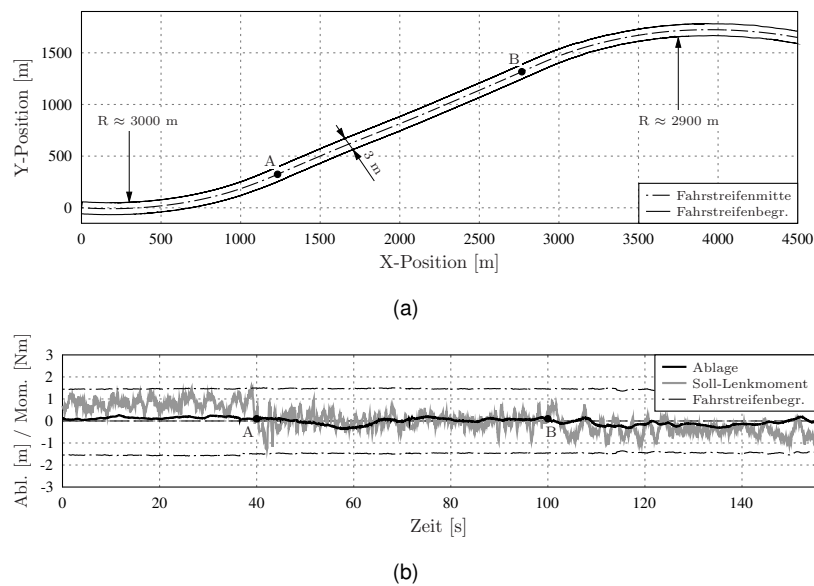


Abbildung 5.7: Untersuchung der Querführungsfunktion bei hoher Geschwindigkeit: (a) Überblick über den Streckenverlauf mit skaliert eingezeichneter Fahrstreifenbreite, (b) zeitlicher Verlauf des Soll-Lenkmoments und der Querabweichung.

das angeforderte Lenkmoment aus der Überlagerung eines Regelanteils und einer Vorsteuerung zur Kompensation der Fahrbahnkrümmung. Die Vorsteuerung bewirkt den in der Abbildung erkennbaren Versatz der Stellgröße von ungefähr 1 Nm für die durchfahrenen Linkskurven und -1 Nm beim Durchfahren der Rechtskurve. Während des Manövers tritt eine maximale Querabweichung von ca. 32 cm auf.

Fahrt mit hoher Geschwindigkeit Als letztes Szenario zur Untersuchung der Querführungsassistenten wird eine Autobahnfahrt mit einer konstanten hohen Geschwindigkeit von ungefähr 50 m/s und dem in Abbildung 5.7(a) dargestellten Streckenverlauf betrachtet. Wie für das zuvor betrachtete Szenario ist die um den Faktor 20 skalierte Fahrstreifenbreite eingezeichnet. Auf die Überlagerung des Stellgrößenverlaufs wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Das Manöver beginnt mit einer Linkskurve (Kurvenradius $R \approx 3000$ m), die im Punkt A in ein Geradenstück übergeht. Nach ungefähr 2000 m beginnt im Punkt B eine Rechtskurve mit einem Kurvenradius von $R \approx 2900$ m. Der zeitliche Verlauf des angeforderten Lenkmoments sowie die Querablage innerhalb des Fahrstreifens sind Abbildung 5.7(b) zu entnehmen. Die Punkte A und B sind entsprechend der Darstellung des Streckenverlaufs ebenfalls eingetragen. Aus der in Abschnitt 4.5 beschriebenen Krümmungskompensation resultieren die in der Abbildung erkennbaren Stellgrößen-niveaus für die Kurvenfahrten bzw. für das Geradenstück. Die Variationen um die Niveaus ergeben sich aus dem Regelungsanteil, mit dem Abweichungen von der Fahrstreifenmitte kompensiert werden. Im Verlauf des Manövers tritt eine maximale Querabweichung von ca. 30 cm

auf.

Anhand der vorgestellten Beispielszenarien wurde die Anwendbarkeit der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Regelung zur Querverführung des Versuchsfahrzeugs veranschaulicht. Eine Bewertung des Systemverhaltens bzw. eine Optimierung der Reglerauslegung wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

5.4 Fahrversuche zur integrierten Längs- und Querverführung

Zur Untersuchung der integrierten Längs- und Querverführungsassistenten werden im folgenden Abschnitt Ergebnisse realer Fahrversuche präsentiert. Das Beispielszenario umfasst den bereits in Abschnitt 4.4 simulativ untersuchten Überholvorgang. In diesem Szenario bewegt sich ein Vorderfahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 22 m/s. Das geregelte Fahrzeug folgt in einem Abstand von ungefähr 40 m. Ausgehend von der Fahrstreifenmitte initiiert der Fahrer des geregelten Fahrzeugs den Überholvorgang, woraufhin ein Fahrstreifenwechsel auf den linken Nachbarfahrstreifen erfolgt. Gleichzeitig mit der Querbewegung wird in Längsrichtung beschleunigt. Auf Höhe des Vorderfahrzeugs wird eine relative Passiergeschwindigkeit von 10 m/s gefordert. Im Folgenden werden Manöver zunächst ohne den Einfluss von fahrerseitigen Störungen und anschließend mit einem Störeingriff durch den Fahrer des geregelten Fahrzeugs durchgeführt. Abbildung 5.8 zeigt die Auslegung der Schaltflächen anhand der in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Projektionen. Außerdem sind die Soll- und Ist-Trajektorie des Systemzustands sowie die zeitlichen Verläufe der Stellgrößen abgebildet.

Die Reglerauslegung erfolgte subjektiv mit dem Ziel einer komfortablen Durchführung des Manövers ohne ruckartige Lenkeingriffe. Gegenüber der Untersuchung in Abschnitt 4.4 wurde hierzu die Grenzsicht insbesondere in Richtung der Quergeschwindigkeitsabweichung aufgeweitet. Diese Auslegung bewirkt ein ruhiges Reglerverhalten, allerdings werden größere Abweichungen des Systemzustands von den Schaltflächen zugelassen.

Überholmanöver ohne Störung Abbildung 5.8(a) zeigt das Manöver ohne Störeingriffe durch den Fahrer. Der Überholvorgang beginnt im markierten Punkt A nach ungefähr 1,5 s und ist nach ca. 10 s abgeschlossen. Der Verlauf der Soll-Längsbeschleunigung weist eine nahezu konstante Anforderung von ca. 1 m/s^2 auf. Die Lenkmomentenanforderung verläuft annähernd sinusförmig und besitzt eine Amplitude von ungefähr 1 Nm. In den Phasenraumdarstellungen wird die Bewegung des Systemzustands bezüglich der Schaltflächen und der Soll-Trajektorie deutlich. Zur Veranschaulichung der Abweichungen von der Soll-Trajektorie sind äquidistante Punkte auf der Systemtrajektorie mit den entsprechenden Punkten auf der Soll-Trajektorie verbunden. In der linken Phasenraumdarstellung im Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta\dot{x}}$ entsteht für einen Abstand von ca. 35 m eine laterale Abweichung des Systemzustands von der Soll-Trajektorie. Dies bewirkt die im Stellgrößenverlauf nach ca. 4 s

erkennbare leichte Reduktion der angeforderten Längsbeschleunigung. Die Ursache der Abweichung von der Soll-Trajektorie ist in der mittleren Darstellung im Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta y}$ ersichtlich. Durch die bei der Reglerauslegung vorgenommene Aufweitung der Grenzschicht wird eine Abweichung von der Schaltfläche toleriert. Mit zunehmender Abweichung baut sich ein Lenkmoment auf, das wiederum eine erhöhte Quergeschwindigkeit zur Folge hat. Ab einem Abstand von ungefähr 25 m bewegt sich der Systemzustand entlang der Soll-Trajektorie, bis der Zielzustand auf Höhe des Vorderfahrzeugs erreicht ist. Entsprechend der Vorgabe beträgt die Relativgeschwindigkeit in Längsrichtung am Ende des Manövers ca. 10 m/s. In Querrichtung erfolgte ein Versatz von ungefähr 3,3 m.

Überholmanöver mit Störung Das zuvor betrachtete Manöver wird mit vergleichbaren Anfangsbedingungen und identischen Soll-Vorgaben erneut durchgeführt. Allerdings erfolgt nun ein störender Lenkradeingriff durch den Fahrer. Hierzu fixiert der Fahrer das Lenkrad, bis sich das geregelte Fahrzeug auf ca. 25 m dem Vorderfahrzeug angenähert hat. Im weiteren Verlauf des Manövers erfolgt kein Fahrereingriff. Die Längsführung wird während des gesamten Manövers von der integrierten Regelung übernommen. Die Bewegung des Systemzustands im Phasenraum bezüglich der Soll-Trajektorie und der Schaltflächen sowie der zeitliche Verlauf der angeforderten Längsbeschleunigung und des Lenkmoments sind in Abbildung 5.8(b) dargestellt. Das Manöver wird nach ungefähr 1,5 s durch den Fahrer eingeleitet (A). Für die Dauer von ca. 6 s erfolgt ein Fahrereingriff über das Lenkrad. Dieser ist in der Phasenraumdarstellung durch unterbrochen dargestellte Hilfslinien bzw. im Stellgrößenverlauf durch den unterbrochen dargestellten Teil des Lenkmomentenverlaufs gekennzeichnet und endet im Punkt B. Wie im Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta y}$ ersichtlich, wird eine Querbewegung durch den Eingriff verhindert. Daraus resultiert ein Anwachsen des angeforderten Lenkmoments, bis das maximale Moment von 3 Nm von der Regelung generiert wird. Im Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta x}$ ist die Bewegung des Systemzustands entlang der Schaltfläche $S_{\Delta x}$ erkennbar. Durch die Abweichung in Querrichtung von der Soll-Trajektorie und die Neigung der Schaltfläche ergibt sich ein geringeres Relativgeschwindigkeitsniveau in Längsrichtung. Dies hat die im zeitlichen Verlauf der Stellgrößen erkennbare Reduktion der angeforderten Längsbeschleunigung auf ca. $0,2 \text{ m/s}^2$ zur Folge. Nach Erreichen des Punktes B erfolgt kein Lenkeingriff durch den Fahrer, so dass das angeforderte Lenkmoment ein Anwachsen der Quergeschwindigkeit bewirkt. Die resultierende Querbewegung führt den Systemzustand in Richtung der Soll-Trajektorie. Im Teilraum $\mathcal{R}_{\Delta x}$ ergibt dies einen Anstieg der durch die Schaltfläche vorgegebenen Relativgeschwindigkeit in longitudinaler Richtung. Als Stellgröße wird eine Längsbeschleunigung von ca. $1,5 \text{ m/s}^2$ angefordert. Dies entspricht der maximal möglichen Beschleunigung, die durch den Motor in dieser Fahrsituation aufgebracht werden kann. Sie reicht nicht aus, um den Systemzustand auf der Schaltfläche zu halten. Jedoch nähert sich der Systemzustand gegen Ende des Manövers dem Zielzustand an. Auf Höhe des Vorderfahrzeugs besitzt das geregelte Fahrzeug eine relative Längsgeschwindigkeit von ungefähr 9 m/s und bewegt sich in der Mitte des linken Nachbarfahrstreifens mit einem Querversatz von ca. 3,3 m.

Anhand des Beispielszenarios eines Überholvorgangs konnte die Anwendbarkeit der in

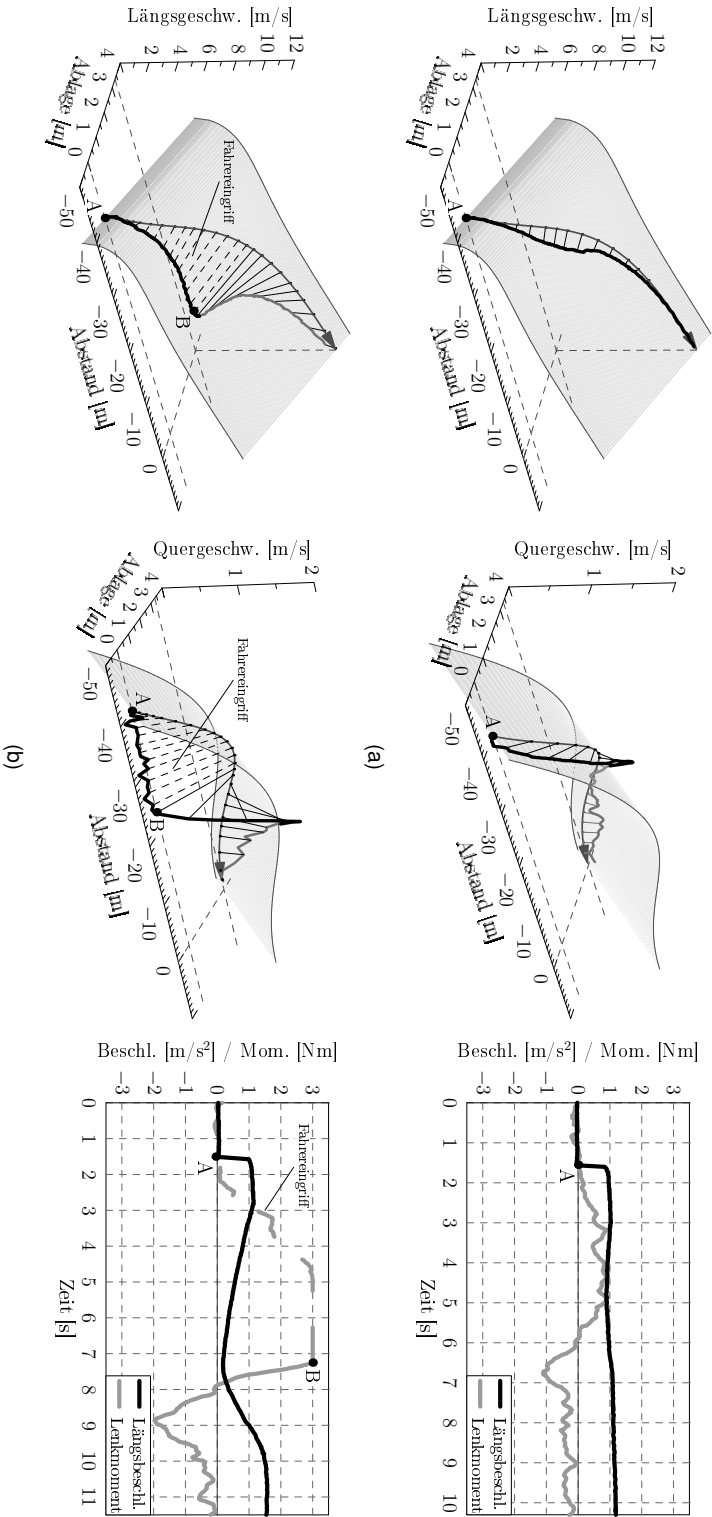


Abbildung 5.8: Untersuchung der integrierten *Sliding-Mode*-Regelung zur Längs- und Querführung in einer komplexen Verkehrssituation: Automatisiert durchgeführter Überholvorgang (a) ohne Störung und (b) mit störendem Lenkadeingriff durch den Fahrer.

5.4 Fahrversuche zur integrierten Längs- und Querführung

Abschnitt 4.4 vorgestellten Regelung auf eine komplexe Verkehrssituation gezeigt werden. Neben dem ungestörten Fall wurde die Reaktion des Regelsystems auf einen störenden Lenkradeingriff verdeutlicht. Durch die Auslegung der Schaltflächen der *Sliding-Mode*-Regelung konnte die Reaktion auf Abweichungen von der Soll-Trajektorie auf anschauliche Weise vorgegeben werden. In den betrachteten Beispielmanövern reagierte das Assistenzsystem aufgrund der impliziten Kopplung der Längs- und Querführung auf eine Abweichung in Querrichtung mit einer Reduktion der Längsbeschleunigung sowie einem verstärkten Quereingriff. Die Auslegung des Systemverhaltens erfolgte dabei anhand von Versuchsfahrten.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Sie können etwas Schönes betrachten, die Bäume und die Wolken und das Licht. Doch wenn das Denken hinzukommt und sagt: "Das war wunderschön", dann ist es bereits vorbei.

(Jiddu Krishnamurti, 1895-1986)

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Entwurf eines Fahrerassistenzsystems zur automatisierten Längs- und Querführung eines Straßenfahrzeugs. Im Unterschied zu autonomen Fahrzeugsystemen, bei denen der Fahrer durch das System ersetzt wird, unterstützt und entlastet das entworfene Assistenzsystem den Fahrer bei der Aufgabe der Fahrzeugführung. Der Fahrer überwacht die Funktion des Assistenzsystems und trägt weiterhin die Verantwortung für die Fahrzeugbewegung. So kann er beispielsweise bei der Vorbereitung und Durchführung eines Fahrstreifenwechsels unterstützt werden, die Entscheidung, ob ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden soll, wird weiterhin vom Fahrer getroffen. Der Längs- und Querregelung der Fahrzeugbewegung können unterschiedliche Architekturen zugrunde liegen. Es wird eine Unterscheidung zwischen parallelen, kombinierten und integrierten Regelungen vorgeschlagen. Die in dieser Arbeit entworfenen Regelsysteme entsprechen einem parallelen Betrieb, in dem ein Längsregler und Querregler unabhängig voneinander die Fahrzeugführung übernehmen sowie einem integrierten Regelsystem, bei dem eine implizite Kopplung der Längs- und Querführung besteht.

Zur simulativen Untersuchung der entworfenen Regelungen wurde die Fahrzeugdynamik experimentell durch Auswertung von Sprungantworten identifiziert. Die Modellierung der Längsdynamik erfolgte mittels linearer Übertragungsglieder mit Begrenzung der maximalen positiven Beschleunigung. Bei der Modellierung der Querbewegung kam ein linearisiertes Einspurmodell zum Einsatz, dessen Eingangsgrößen aus einem linearen Modell

der Lenkaktorik stammen. Zur gleichzeitigen Beschreibung der Längs- und Querbewegung des Versuchsfahrzeugs wurde ein kombiniertes Modell hergeleitet, das als Wechselwirkung die momentane Fahrgeschwindigkeit sowie den bei Kurvenfahrten auftretenden Kurvenwiderstand berücksichtigt. Die hergeleiteten Modelle wurden durch den Vergleich realer Messfahrten mit Simulationen unter dem Einfluss zufällig aufgeschalteter Eingangssignale validiert. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen der realen und der simulierten Fahrzeugbewegung.

Anhand der Fahrzeugmodelle wurden Regelungssysteme entworfen und anschließend deren Funktionalität überprüft. Das regelungstechnische Vorgehen gliederte sich dabei strukturell in zwei Regelungsebenen. Auf einer übergeordneten Ebene werden Beschleunigungsanforderungen in Längs- und Querrichtung generiert, die auf einer unterlagerten Ebene durch Beschleunigungsregler in Stellsignale für die Fahrzeugaktorik umgesetzt werden. Die in der übergeordneten Regelungsschicht entworfenen Regler umfassen einen Geschwindigkeitsregler, der die vom Fahrer vorgegebene Zielgeschwindigkeit einregelt, einen Abstandsregler zur Einhaltung von Wunschabständen zu vorausfahrenden Fahrzeugen sowie einen Querregler, der das Fahrzeug kontinuierlich entlang der Fahrstreifenmitte führt. Darüberhinaus wurde eine integrierte Regelung entworfen, deren Funktionsweise am Beispiel eines Überholmanövers mit Fahrstreifenwechsel und gleichzeitiger positiver Längsbeschleunigung veranschaulicht wurde. Während die Geschwindigkeitsregelung auf einem Kennlinienregler basierte, erfolgte die Regelung der Längs- und Querdynamik anhand eines strukturvariablen Reglers, bei dem ein Gleitzustand der Zustandsgrößen während des Regelvorgangs auftritt. Das Prinzip dieses sogenannten *Sliding-Mode*-Reglers wurde erläutert und auf die Abstands- und Querregelung angewandt. Für den parallelen Betrieb zweier separater Regler für die Längs- und Querverführung des Fahrzeugs erfolgte der Reglerentwurf in jeweils zweidimensionalen Phasenräumen, die den Abstand und die Relativgeschwindigkeit bezüglich des Vorderfahrzeugs bzw. die Querablage und die Quergeschwindigkeit bezüglich der Fahrstreifenmitte umfassen. Das Prinzip der idealen *Sliding-Mode*-Regelung wurde für die Abstandsregelung um ein Grenzschichtkonzept erweitert. Für die Querregelung wurde zusätzlich ein äquivalenter Regelungsanteil eingeführt. Das Systemverhalten beider Regler wurde mittels einer nichtlinearen Schaltkurve definiert. Im Falle der integrierten Längs- und Querregelung wurden die beiden zuvor einzeln betrachteten Phasenräume zu einem vierdimensionalen Zustandsraum zusammengefasst. Aus der Vorgabe einer Soll-Trajektorie in diesem Zustandsraum wurden Schalthyperflächen abgeleitet, deren Auslegung das Regelungsverhalten beeinflusst. Anhand von Simulationen wurden die Regelungen mit unterschiedlichen Parametrierungen für beispielhafte Szenarien untersucht.

Abschließend wurden die entworfenen Regler in ein Fahrerassistenzsystem zur automatisierten Längs- und Querverführung eines Versuchsfahrzeugs implementiert. Dazu wurden die Komponenten des Assistenzsystems sowie deren Vernetzung untereinander beschrieben. Zur Beeinflussung der Fahrzeugbewegung wurde die serienmäßige Aktorik des Versuchsträgers genutzt. Die Erfassung des Fahrzeugumfelds erfolgte durch die serienmäßige Sensorik eines ACC- bzw. eines Spurhaltesystems. Weiterhin wurde ein prototypisches Bedienkonzept umgesetzt, das Bedienelemente für Fahrereingaben, die Anzeige des Sys-

temzustands und Zustandsautomaten zur Aktivierung der Führungsfunktionen umfasst. Die Anwendbarkeit der zuvor entworfenen Regelungen wurde anhand realer Fahrversuche nachgewiesen. Als Szenario für die Längsführung wurde die Annäherung an ein mit konstanter Geschwindigkeit fahrendes Vorderfahrzeug gewählt. Die Anfangsbedingungen variierten dabei von unkritischen Ausgangssituationen bis hin zu kritischen Annäherungen, wobei alle betrachteten Manöver mit der gleichen Reglerauslegung durchgeführt wurden. Zur Untersuchung der Querführungsfunktion wurden Versuchsfahrten in unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Zunächst wurde das Systemverhalten bei geradem Streckenverlauf unter dem Einfluss von Störungen betrachtet. Dazu wurde das Versuchsfahrzeug durch Lenkeingriffe des Fahrers von der Fahrstreifenmitte ausgelenkt. Als weiteres Szenario wurde eine Autobahnfahrt mit stark gekrümmtem Streckenverlauf betrachtet. Der durchfahrene Streckenabschnitt beinhaltete Kurven mit dem für Autobahnen zulässigen Minimalradius. Als letztes Szenario wurde eine Autobahnfahrt bei hoher Geschwindigkeit untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die entworfene Regelung wiederum mit einer konstanten Reglerparametrierung für die unterschiedlichen Einsatzszenarien geeignet war. Abschließend erfolgten Fahrversuche zur Untersuchung der integrierten Längs- und Querregelung. Anhand eines Überholmanövers mit Fahrstreifenwechsel bei gleichzeitiger Längsbeschleunigung konnte das Einsatzgebiet des Assistenzsystems auf ein komplexes Verkehrsszenario erweitert werden. Das Manöver wurde ohne Störeingriff sowie mit störendem Lenkradeingriff seitens des Fahrers durchgeführt. Die Auslegung der Schaltflächen der *Sliding-Mode*-Regelung ermöglichte dabei eine anschauliche Vorgabe des Systemverhaltens. Insbesondere für den gestörten Fall reagierte das System auf einen Fehler in der Querablage sowohl mit einem verstärkten Lenkeingriff als auch mit einer Reduktion der Längsbeschleunigung.

Die Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit zeigt, dass die in Abschnitt 1.2 formulierten Ziele mit dem beschriebenen Vorgehen erfüllt werden konnten. Das wesentliche Ergebnis der Arbeit ist der Entwurf und eine experimentelle Validierung eines Fahrerassistenzsystems zur automatisierten Längs- und Querführung, wobei eine parallele Regelung, insbesondere aber eine integrierte Regelung der Fahrzeugbewegung in den beiden Bewegungsrichtungen realisiert wurde.

Ausblick

Die in dieser Arbeit entworfenen Längs- und Querregelungssysteme sind geeignet, ein Fahrzeug in vielfältigen Verkehrssituationen auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen automatisiert zu führen. Mit der integrierten Regelung der Längs- und Querdynamik konnte die Verfügbarkeit des Assistenzsystems auf das komplexe Manöver eines Überholvorgangs erweitert werden. In zukünftigen Arbeiten können weitere Szenarien behandelt werden, in denen eine Vorgabe des Bewegungszustands in Längs- und Querrichtung von Bedeutung ist. Dies gilt z. B. für Autobahnauf- und -abfahrten oder für Fahrstreifenverengungen in Verbindung mit kleinen Kurvenradien, beispielsweise in Baustellen. Zur Behandlung solch vielfältiger Situationen ist eine Instanz vorzusehen, die anhand einer Umfeldin-

interpretation kontinuierlich geeignete Soll-Zustände vorgibt. Hierbei können die Schaltflächen und damit das qualitative Reglerverhalten variiert und an die jeweilige Verkehrssituation angepasst werden.

Forschungsbedarf besteht weiterhin im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Dabei gilt es vor allem, ein Bedienkonzept mit geeigneten Bedien- und Anzeigeelementen zur Vorgabe komplexer Manöver zu entwickeln. Ansätze hierzu werden z. B. von Winner und Hakuli (2006) beschrieben. Auch sind Aktivierungsstrategien für mögliche Einschränkungen der Verfügbarkeit des Assistenzsystems zu untersuchen, beispielsweise wenn der Fahrstreifenverlauf nicht detektierbar ist.

Die Parametrierung der vorgestellten Regelungen erfolgte subjektiv. Die Optimierung der Reglerauslegung kann unter Berücksichtigung verschiedener Gesichtspunkte erfolgen. So könnten Studien zu durchschnittlichen Querschleunigungen von Normalfahrern z. B. von Schimmelpfennig und Nackenhorst (1985) als Grundlage des Reglerentwurfs dienen. Neben Komfortbetrachtungen sind ebenfalls Sicherheitsuntersuchungen anzustellen. Für die integrierte Längs- und Querregelung sind hierzu Untersuchungen der Erreichbarkeit und Attraktivität durchzuführen. Vergleichbar mit der Warnstrategie bei der Abstandsregelung könnten darauf aufbauend Bereiche im Zustandsraum definiert werden, die von dem Assistenzsystem nicht beherrschbar sind und eine Fahrerübernahme erfordern.

Literaturverzeichnis

- Ackermann u. a. 1995** ACKERMANN, Jürgen ; GULDNER, Jürgen ; SIENEL, Wolfgang ; STEINHAUSER, Reinhold ; UTKIN, Vadim I.: Linear and Nonlinear Controller Design for Robust Automatic Steering. In: *IEEE Trans. on Control Systems Technology* 3 (1995), S. 132–143
- Aktiv 2006** AKTIV: *Aktiv - gemeinsam die Zukunft erfahren*. Image-Broschüre, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2006
- Allgöwer 1996** ALLGÖWER, Frank: *Näherungsweise Ein-/Ausgangs-Linearisierung nichtlinearer Systeme*. VDI Reihe 8. Düsseldorf : VDI Verlag, 1996 (Fortschritt-Berichte 582)
- Allgöwer und Gilles 1995** ALLGÖWER, Frank ; GILLES, Ernst D.: *Einführung in die exakte und näherungsweise Linearisierung nichtlinearer Systeme*. Kap. 1, S. 23–52, Oldenbourg Verlag, 1995
- Apel 1997** APEL, Andreas: *Modellierung des Fahrerverhaltens bei Längs- und Querführung von Pkw*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1997
- Berger und Rumpe 2008** BERGER, Christian ; RUMPE, Bernhard: Autonomes Fahren – Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge. In: *it* 4 (2008), S. 258–264
- Bose und Ioannou 2001** BOSE, Arnab ; IOANNOU, Petros: Analysis of Traffic Flow With Mixed Manual and Intelligent Cruise Control Vehicles: Theory and Experiments / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 2001. – Forschungsbericht
- Braess 2003** BRAESS, Hans-Hermann: *Das intelligente Auto auf der intelligenten Straße - Was hat PROMETHEUS gebracht?* Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, 2003
- Broggi u. a. 1999a** BROGGI, A. ; BERTOZZI, M. ; FASCIOLI, A.: ARGO and the MilleMiglia in Automatico Tour. In: *IEEE Intelligent Systems and their Applications* 14 (1999), Nr. 1, S. 55–64
- Broggi u. a. 1999b** BROGGI, Alberto ; BERTOZZI, Massimo ; FASCIOLI, Alessandra ; CONTE, Gianni: *Automatic Vehicle Guidance: The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle*. World Scientific Publishing, 1999
- Brüdigam 1994** BRÜDIGAM, Claus: *Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1994

- Buld und Krüger 2002** BULD, Susanne ; KRÜGER, Hans-Peter: Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit / Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften, Universität Würzburg. 2002. – Forschungsbericht
- Bühler u. a. 2006** BÜHLER, Martin (Hrsg.) ; IAGNEMMA, Karl (Hrsg.) ; SINGH, Sanjiv (Hrsg.): *The 2005 DARPA Grand Challenge: The Great Robot Race*. Springer, 2006
- Chee und Tomizuka 1997** CHEE, Wonshik ; TOMIZUKA, Masayoshi: Unified Lateral Motion Control of Vehicles for Lane Change Maneuvers in Automated Highway Systems / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 1997. – Forschungsbericht
- Darenberg 1987** DARENBERG, W.: Automatische Spurführung von Kraftfahrzeugen. In: *Automobil-Industrie*. 1987, S. 155–159
- Deuschle 2006** DEUTSCHLE, Stefan: Das KONVOI Projekt - Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektronisch gekoppelten Lkw-Konvois auf Autobahnen. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (2006)
- Dinse u. a. 2001** DINSE, Gundi ; GIESA, Hans-Gerhard ; HELL, Walter: *Der Verkehr in Ballungsräumen im Jahr 2020: Perspektiven auf Basis einer Delphistudie aus dem Jahr 2000*. Kap. 5, S. 287–305, Thomas Jürgensohn and Klaus-Peter Timpe, 2001
- Donges 1982** DONGES, E.: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie* (1982), S. 183–190
- Dorißen u. a. 1994** DORISSEN, H.-T. ; HOBEIN, D. ; HÖVER, N.: AICC – ein neues intelligentes Assistenzsystem / VDI-Berichte 1152. 1994. – Forschungsbericht
- Drenckhahn 2006** DRENCKHAHN, Gerald: *Automatische Fahrzeugführung mittels Modellfolge*, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2006
- Duden 2003** DUDEN: *Deutsches Universalwörterbuch*. Bibliographisches Institut, Mannheim, 2003
- Edwards und Spurgeon 1998** EDWARDS, Christopher ; SPURGEON, Sarah K.: *Sliding Mode Control - Theory and Applications*. Taylor & Francis, 1998
- Ehmanns u. a. 2000** EHMANNs, Dirk ; WALLENTOWITZ, Henning ; GELAU, Christhard ; NICKLISCH, Frank: Zukünftige Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und Methoden zu deren Bewertung. In: *9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (2000)
- Enkelmann 1997** ENKELMANN, W.: *Entwicklung von Systemen zur Interpretation von Straßenverkehrsszenen durch Bildfolgenauswertung*. Infix Verlag, 1997
- Fenton u. a. 1976** FENTON, R. E. ; MELOCIK, G. C. ; OLSON, K. W.: On the Steering of Automated Vehicles: Theory and Experiment. In: *Trans. on Automatic Control* 21 (1976), Nr. 3
- Forst und Hoffmann 2005** FORST, Wilhelm ; HOFFMANN, Dieter: *Gewöhnliche Differentialgleichungen*. Springer, 2005
- Frankel u. a. 1994** FRANKEL, Jonathan ; ALVAREZ, Luis ; HOROWITZ, Roberto ; LI, Perry: Robust Platoon Maneuvers for AVHS / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 1994. – Forschungsbericht

- Fritz 2002** FRITZ, Axel: *Zur Abstandsregelung mechatronischer gekoppelter Fahrzeuggespanne*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2002
- Fritz 1997** FRITZ, Hans: *Neuronale Regelung am Beispiel der autonomen Fahrzeugführung*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1997
- Föllinger 1992** FÖLLINGER, Otto: *Regelungstechnik*. 7. Hüthig, 1992
- Ganzelmeier u. a. 2004** GANZELMEIER, L. ; BECKER, U. ; SCHNIEDER, E.: Nichtlineare Regelung der Fahrzeuglängsdynamik für zukünftige fahrzeugübergreifende Assistenzsysteme. In: *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2004*. Wiesloch, 2004
- Gehring 2000** GEHRING, Ottmar: *Automatische Längs- und Querführung einer Lastkraftwagenkolonne*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2000
- Gerdes 1996** GERDES, Joseph C.: *Decoupled Design of Robust Controllers for Nonlinear Systems: As Motivated by and Applied to Coordinated Throttle and Brake Control for Automated Highways*, University of California, Berkeley, Dissertation, 1996
- Germann 1997** GERMANN, Stefan: *Modellbildung und modellgestützte Regelung der Fahrzeuglängsdynamik*, Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1997
- Girard u. a. 2002** GIRARD, Anouck R. ; SOUSA, Jo ao Borges de ; MISENER, James A. ; HEDRICK, J. K.: A Control Architecture for Integrated Cooperative Cruise Control and Collision Warning Systems / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 2002. – Forschungsbericht
- Godbole und Lygeros 1993** GODBOLE, Datta ; LYGEROS, John: Longitudinal Control of the Lead Car of a Platoon / Institute of Transportation Studies, University of California. Berkeley, 1993. – Forschungsbericht
- Griswold u. a. 1994** GRISWOLD, N. C. ; KEHTAMAVAZ, N. D. ; MILLER, K. M.: A Transportable Neural Network Controller for Autonomous Vehicle Following. In: *Proc. Intelligent Vehicles '94 Symposium*. Paris, 1994, S. 195–200
- Guldner 1999** GULDNER, Jürgen: Regelungstechnische Betrachtungen zur automatischen Lenkung von Kraftfahrzeugen. In: *at* 47 (1999), Nr. 11, S. 515–522
- Guldner u. a. 1997** GULDNER, Jürgen ; SIENEL, Wolfgang ; TAN, Han-Shue ; ACKERMANN, Jürgen ; PATWARDHAN, Satyajit ; BUNTE, Tilman: Robust Automatic Steering Control for Look-Down Reference Systems with Front and Rear Sensors / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 1997. – Forschungsbericht
- Götting 2001** GÖTTING, H.-H.: Automatisiertes Fahren mit Nutzfahrzeugen. In: *Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel*, 2001
- Hackenberg und Heißing 1982** HACKENBERG, U. ; HEISSING, B.: Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. In: *ATZ* 84 (1982), Nr. 7/8, S. 341–345

- Haller 2001** HALLER, Rudolf: *Fahrer-Assistenz versus Fahrer-Bevormundung: Wie erreicht man, dass der Fahrer Herr der Situation bleibt?* Kap. 1, S. 31–38, Thomas Jürgensohn and Klaus-Peter Timpe, 2001
- Hartwich 1974** HARTWICH, E.: Entwurf eines automatischen Abstandsreglers für ein Straßenfahrzeug. In: *Regelungstechnik* (1974), S. 204–212
- Hebisch 1995** HEBISCH, H.: Grundlagen der Sliding-Mode-Regelung / Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg. 1995. – Forschungsbericht
- Helbig 2004** HELBIG, Jörg: *Robuste Regelungsstrategien am Beispiel der PKW-Spurführung*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2004
- Hessburg u. a. 1994** HESSBURG, Thomas ; PENG, Huei ; ZHANG, Wei bin ; ARAI, Alan ; TOMIZUKA, Masayoshi: Experimental Results of Fuzzy Logic Control for Lateral Vehicle Guidance / University of California, Berkeley. 1994. – Forschungsbericht
- Hessburg 1994** HESSBURG, Thomas M.: *Fuzzy Logic Control with Adaptive Methods for Vehicle Lateral Guidance*, University of California, Berkeley, Dissertation, 1994
- Hingwe und Tomizuka 1995** HINGWE, Pushkar ; TOMIZUKA, Masayoshi: Lateral Control of Commuter Buses / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 1995. – Forschungsbericht
- Hingwe und Tomizuka 1997** HINGWE, Pushkar ; TOMIZUKA, Masayoshi: Experimental Evaluation of a Chatter Free Sliding Mode Control for lateral Control in AHS. (1997)
- Hoffmann 2006** HOFFMANN, Christian: *Fahrzeugdetektion durch Fusion monoskopischer Videomerkmale*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2006
- Horowitz und Sidi 1972** HOROWITZ, I. ; SIDI, M.: Synthesis of feedback systems with large plant ignorance for prescribed time-domain tolerances. In: *International Journal of Control* 16 (1972), S. 287–309
- Horowitz 1963** HOROWITZ, Isaac: *Synthesis of Feedback Systems*. Academic Press, 1963
- Horowitz 1997** HOROWITZ, R.: Automated Highway Systems: The Smart Way to Go. In: *IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems* Bd. 2, 1997, S. 452–463
- Horowitz und Varaiya 2000** HOROWITZ, Roberto ; VARAIYA, Pravin: Control Design of an Automated Highway System. (2000)
- Hübner und Becker 2008** HÜBNER, M. ; BECKER, U.: Querstabilisierung von Fahrzeug-Anhänger-Gespannen mittels Sliding-Mode-Regelung. In: *Theoretische Verfahren der Regelungstechnik*, 2008
- Internationale Organisation für Normung 2002** Internationale Organisation für Normung (Veranst.): *ISO 15622: Transport Information and Control Systems - Adaptive Cruise Control Systems - Performance Requirements and Test Procedures*. 1. 2002
- Isidori 1995** ISIDORI, Alberto: *Nonlinear Control Systems*. Springer-Verlag, 1995
- Jaschke 2002** JASCHKE, Klaus P.: *Lenkregler für Fahrzeuge mit hoher Schwerpunktlage*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2002

- Jezernik 1995** JEZERNIK, Karel: Robust Chattering Free Sliding Mode Control of Servo Drives. In: *International Conference on Power Electronics and Drive Systems* Bd. 1, 1995, S. 202–207
- Jones 2001** JONES, Willie D.: Keeping Cars from Crashing. In: *IEEE Spectrum* (2001), September, S. 40–44
- Jürgensohn und Timpe 2000** JÜRGENSOHN, Thomas ; TIMPE, Klaus-Peter: *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2000
- Khatir und Davison 2006** KHATIR, Maziar E. ; DAVISON, Edward J.: A Decentralized Lateral-Longitudinal Controller for a Platoon of Vehicles Operating on a Plane. (2006)
- Koch u. a. 2005** KOCH, Hans-Joachim ; HAAREN, Christina von ; BRUNNER, Paul H. ; FOTH, Heidi ; JÄNICKE, Martin ; MICHAELIS, Peter ; OTT, Konrad: *Umwelt und Straßenverkehr: Hohe Mobilität - Umweltverträglicher Verkehr*. Sondergutachten. 2005
- Košecká u. a. 1998** KOŠECKÁ, J. ; BLASI, R. ; TAYLOR, C. J. ; MALIK, J.: A Comparative Study of Vision-Based Lateral Control Strategies for Autonomous Highway Driving. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*. Leuven, Belgium, 1998
- Kusunoki 1996** KUSUNOKI, H.: Vehicle Lateral Control Development Using Laser Radar to Detect Reflective Lane Markers. In: *Vehicle System Dynamics* 25 (1996)
- Kölbl und Zahn 2006** KÖLBL, Christian ; ZAHN, Peter: Entwicklung eines integrierten Quer- und Längsreglers zur Fahrzeugführung. (2006)
- Köppel und Bock 1977** KÖPPEL, G. ; BOCK, H.: Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kurvigkeit / Bundesministerium für Verkehr. 1977. – Forschungsbericht
- Lim 1996** LIM, Edward M.: *Lateral and Longitudinal Vehicle Control Coupling in the Automated Highway System*, California Maritime Academy, Diplomarbeit, 1996
- Ljung 2008** LJUNG, Lennart: *System Identification Toolbox 7 - User's Guide*. The MathWorks, Inc. 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098: , 2008
- Maciejowski 2002** MACIEJOWSKI, J. M.: *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, 2002
- Manigel 1993** MANIGEL, J.: *Autonome Fahrzeugführung durch Rechnersehen*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1993
- Maurer 2000** MAURER, Markus: *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. Düsseldorf, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2000
- Mayr 2001** MAYR, Robert: *Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung: Längs- und Querregelung, Spurwechsel- und Überholmanöver*. Springer, 2001
- Mitschke und Wallentowitz 2004** MITSCHKE, Manfred ; WALLENTOWITZ, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer, 2004
- Monsees 2002** MONSEES, Govert: *Discrete-Time Sliding Mode Control*, Technische Universiteit Delft, Dissertation, 2002
- MOTIV 2000** MOTIV: *Abbiege- und Spurwechselassistentz Abschlussbericht (MoTiV)*. 2000

- Müller 1996** MÜLLER, Nikolaus: *Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Straßenfahrzeug*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1996
- Naab 1999** NAAB, K.: Abstandsregelung (ACC) / Haus der Technik E. V. Essen, Dezember 1999. – Forschungsbericht
- Naab und Reichart 1998** NAAB, K. ; REICHART, G.: Grundlagen der Fahrerassistenz und Anforderungen aus Nutzersicht. In: *Seminar "Fahrerassistenzsysteme"*. Haus der Technik, Essen, 1998
- Nirschl und Kopf 1997** NIRSCHL, G. ; KOPF, M.: Untersuchung des Zusammenwirkens zwischen dem Fahrer und einem ACC-System in Grenzsituationen. In: *VDI-Berichte* 1317 (1997), S. 119–148
- Nöcker 1990** NÖCKER, G.: Abstandsregelung – Autonomous Intelligent Cruise Control / VDI-Berichte 817. 1990. – Forschungsbericht
- Oestereich 2004** OESTEREICH, Bernd: *Objektorientierte Softwareentwicklung - Analyse und Design mit der UML 2.0*. Oldenbourg Verlag, 2004
- Peng u.a. 1992** PENG, Huei ; ZHANG, Wei-Bin ; ARAI, Alan ; LIN, Ye ; HESSBURG, Thomas ; DEVLIN, Peter ; TOMIZUKA, Masayoshi ; SHLADOVER, Steven: Experimental Automatic Lateral Control System for an Automobile / University of California, Berkeley. 1992. – Forschungsbericht
- Perruquetti und Barbot 2002** PERRUQUETTI, Wilfrid (Hrsg.) ; BARBOT, Jean P. (Hrsg.): *Sliding Mode Control in Engineering*. 2002
- Pham u.a. 1994** PHAM, H. ; HEDRICK, K. ; TOMIZUKA, M.: Combined Lateral and Longitudinal Control of Vehicles for IVHS. In: *Proceedings of the American Control Conference (ACC)* 2 (1994), S. 1205–1209
- Pomerleau 1993** POMERLEAU, D. A.: Neural Networks for Intelligent Vehicles. In: *Proc. Intelligent Vehicles '93 Symposium*. Tokyo, 1993, S. 19–24
- Richert u.a. 2004** RICHERT, F. ; ZAMBOU, N. ; BOLLIG, A. ; ABEL, D. ; SANDKÜHLER, D.: Modellbasierte Stop-and-Go-Regelung für den INVENT-Stauassistenten. In: *VDE-Kongress 2004, 18.-20.10.2004, Berlin*, 2004. – 18.-20.10.2004, Berlin
- Rodić und Vukobratović 2002** RODIĆ, Aleksandar D. ; VUKOBRATOVIĆ, Miomir K.: *Dynamics, Integrated Control and Stability of Automated Road Vehicles*. ibidem, 2002
- Rohloff 2008** ROHLOFF, Michael ; VERKEHRSWESSEN, Forschungsgesellschaft für Straßen-und (Hrsg.): *Richtlinie für die Anlage von Autobahnen*. FGSV Verlag GmbH, 2008
- Roppenecker 1994** ROPPENECKER, G.: Fahrzeugdynamik: Grundlagen der Modellierung und Regelung. In: *at - Automatisierungstechnik* 10 (1994), Nr. 42, S. 429–441
- Scheeck 1997** SCHEECK, Romain: *Ein Beitrag zur robusten Regelung nichtlinearer Strecken nach dem Sliding Mode Prinzip*, Universität Kaiserslautern, Dissertation, 1997
- Schimmelpfennig und Nackenhorst 1985** SCHIMMELPFENNIG, Karl-Heinz ; NACKENHORST, Udo: Bedeutung der Querschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion

- Sicherheitsgrenze des Normalfahrers –. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 4 (1985), S. 94–96
- Schnieder 2007** SCHNIEDER, Eckehard: *Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs*. Springer Verlag, 2007 (VDI-Buch)
- Shladover u. a. 2001** SHLADOVER, Steven ; WERF, Joel van der ; MILLER, Mark A. ; KOURJANSKAIA, Natalie ; KRISHNAN, Hariharan: Development and Performance Evaluation of AVCSS Deployment Sequences to Advance from Today's Driving Environment to Full Automation / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 2001. – Forschungsbericht
- Shladover 1992** SHLADOVER, Steven E.: The California PATH Program: A State Approach to IVHS Research. In: *Vehicle Electronics meeting Society's Needs: Energy, Environment, Safety* Bd. 260. Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 1992, S. 329–338
- Siedersberger 2003** SIEDERSBERGER, Karl-Heinz: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2003
- Stiller 2005** STILLER, Christoph: Fahrerassistenzsysteme – Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer Verlag, 2005, S. 1–20
- Swaroop 1994** SWAROOP, D. V. A. H. G.: *String Stability of Interconnected Systems: An Application to Platooning in Automated Highway Systems*, University of California, Berkeley, Dissertation, 1994
- Söhnitz 2001** SÖHNITZ, Ina: *Querregelung eines autonomen Straßenfahrzeugs*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2001
- Tai und Tomizuka 2003** TAI, Meihua ; TOMIZUKA, Masayoshi: Robust Lateral Control of Heavy Duty Vehicles: Final Report / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 2003. – Forschungsbericht
- Takayama und Hirako 1991** TAKAYAMA, A. ; HIRAKO, A.: Adaptive Cruise Control According to Optimal Distance. In: *IEEE Roundtable Discussion on Fuzzy and Neural Systems and Vehicle Applications*, 1991
- Tan u. a. 2002** TAN, H.-S. ; BOUGLER, B. ; ZHANG, W.-B.: Automatic Steering Based on Roadway Markers: From Highway Driving to Precision Docking. In: *The International Journal of Robotics Research* 37 (2002), Nr. 5, S. 315–338
- Tan und Kanellakopoulos 2000** TAN, Yaolong ; KANELLAKOPOULOS, Ioannis: Longitudinal Control of Commercial Heavy Vehicles: Experimental Implementation / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 2000. – Forschungsbericht
- Tijerina und Hetrick 1996** TIJERINA, L. ; HETRICK, S.: Analytical Evaluation of the Effectiveness of Minimum Separation Distance and Turn-Signal Onset Rules for Lane

- Change Crash Avoidance System Warning Onset. In: *National Highway Traffic Safety Administration* (1996)
- Tsugawa 1997** TSUGAWA, Sadayuki: Vision-Based Vehicles in Japan: Machine Vision Systems and Driving Control Systems. In: *IEEE Trans. on Industrial Electronics* 41 (1997), Nr. 4
- Unbehauen 2000a** UNBEHAUEN, Heinz: *Regelungstechnik I - Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme*. 10. Braunschweig/ Wiesbaden : Vieweg, 2000
- Unbehauen 2000b** UNBEHAUEN, Heinz: *Regelungstechnik II - Zustandsregelung, digitale und nichtlineare Regelsysteme*. 10. Braunschweig/ Wiesbaden : Vieweg, 2000
- Utkin 1981** UTKIN, Vadim I.: *Sliding Modes in Control Optimization*. Springer-Verlag, 1981
- Varaiya 1993** VARAIYA, P.: Smart Cars on Smart Roads: Problems of Control. In: *Trans. on AC*. 38 (1993), Nr. 2
- Venhovens u. a. 2000** VENHOVENS, P. ; NAAB, K. ; ADIPRASITO, B.: Stop and Go Cruise Control. In: *International Journal of Automotive Technology* 1 (2000), Nr. 2, S. 61–69
- Voy u. a. 1987** VOY, Christian ; PANIK, Ferdinand ; REISTER, Dietrich ; HAMM, Ludwig: PROMETHEUS, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft. In: *Automobil-Industrie* (1987), S. 139–144
- Weilkes 2000** WEILKES, Michael: *Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation*, RWTH Aachen, Dissertation, 2000
- Weilkes u. a. 2005** WEILKES, Michael ; BÜRKLE, Lutz ; RENTSCHLER, Tobias ; SCHERL, Michael: Zukünftige Fahrzeugführungsassistenz - Kombinierte Längs- und Querregelung. In: *at* 1 (2005), S. 4–9
- Winner und Hakuli 2006** WINNER, H. ; HAKULI, S.: Conduct-by-Wire – Following a New Paradigm for Driving into the Future. In: *FISITA World Automotive Congress*, 2006
- Yamawaki u. a. 2000** YAMAWAKI, Toshihiko ; YAMANO, Shin ichi ; KATO, Yutaka ; TAMURA, Toshihiko ; OHIRA, Yasuyuki: Millimeter-Wave Obstacle Detection Radar / Fujitsu Ten Tech. M. 2000 (15). – Forschungsbericht
- Zambou u. a. 2004** ZAMBOU, N. ; RICHERT, F. ; SCHLOSSER, A. ; ABEL, D. ; SANDKÜHLER, D.: Modellgestützte Prädiktive Regelung zur Längsführung von Kraftfahrzeugen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich. In: *Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren, AUTOREG 2004 VDI-Berichte 1828* (2004), S. 361–370. – VDI-Berichte 1828
- Zambou 2005** ZAMBOU, Nathan: *Lagrange-basierte und modellgestützte Regelungsstrategie für die automatische Fahrzeugführung im Konvoi*, RWTH Aachen, Dissertation, 2005
- Zapp 1988** ZAPP, A.: *Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1988
- Zell 1994** ZELL, Andreas: *Simulation neuronaler Netze*. Oldenbourg, 1994

Zhang und Shladover 1997 ZHANG, Wei-Bin ; SHLADOVER, Steven: California PATH Magnetic Guidance System / California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 1997. – Forschungsbericht